

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет водного господарства  
та природокористування

Л.Й. Дворкін, О.М. Бордюженко, В.В. Житковський,  
Д.В. Кочкарьов, В.В. Марчук

# **РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВІ БЕТОНИ І МАТЕРІАЛИ НА ЇХ ОСНОВІ**

За редакцією д.т.н., професора Л.Й. Дворкіна

*Монографія*

Рівне 2020

УДК 691.32

РЗ1

Авторський колектив: Л. Й. Дворкін, О. М. Бордюженко,  
В. В. Житковський, Д. В. Кочкарьов, В. В. Марчук

**Рецензенти:**

**Вировий В. М.**, доктор техн. наук, професор Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса;

**Шейніч Л. О.**, доктор техн. наук, професор Державного науково-дослідного інституту будівельних конструкцій, м. Київ.

*Рекомендовано науково-технічною радою Національного  
університету водного господарства та природокористування.*

*Протокол № 131 від 25 червня 2020 р.*

**РЗ1** Реакційно-порошкові бетони і матеріали на їх основі :  
монографія / за редакцією д.т.н., професора Л. Й. Дворкіна. – Рівне :  
НУВГП, 2020. – 305 с.

**ISBN 978-966-327-476-8**

У монографії розглянуті результати досліджень технологічних параметрів та основних властивостей реакційно-порошкових та фібробетонів з застосуванням різноманітних сировинних матеріалів включаючи техногенну сировину: золи, шлаки, мета каолін, аспіраційний пил та ін.

Запропонований комплекс експериментально-статистичних моделей, що дозволяє прогнозувати властивості розглянутих бетонів залежно від їх складу та режимних параметрів отримання.

Показані можливості застосування РПБ як напавфабрикату для отримання різноманітних будівельних сумішей різного призначення.

**УДК 691.32**

**ISBN 978-966-327-476-8**

© Л. Й. Дворкін, О. М. Бордюженко,  
В. В. Житковський, Д. В. Кочкарьов,  
В. В. Марчук, 2020

© НУВГП, 2020

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП .....</b>	<b>5</b>
<b>РОЗДІЛ І. ТЕХНОЛОГІЯ І ВЛАСТИВОСТІ РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВИХ БЕТОНІВ.....</b>	<b>6</b>
1.1. Загальні відомості.....	6
1.2. Застосування реакційно-порошкових бетонів (РПБ) при зведенні відповідальних конструкцій та захисних споруд ..	10
1.3. Вплив матеріалів та технологічних параметрів на властивості РПБ .....	14
1.4. Мета і основні задачі досліджень .....	20
1.5. Теоретичні передумови формування властивостей реакційно- порошкових бетонів .....	21
1.5.1. Вплив структурних особливостей РПБ на його міцність ...	21
1.5.2. Вплив активних мінеральних наповнювачів на структуро-утворення і властивості бетону .....	31
1.5.3. Введення суперпластифікаторів і зниження В/Ц .....	42
1.5.4. Зерновий склад і співвідношення заповнювачів .....	44
1.6. Експериментальне обґрунтування складів реакційно-порошкових бетонів .....	53
1.6.1. Вплив водо-в'язучого відношення, різних видів суперпластифікаторів та мінеральних добавок .....	53
1.6.2. Аналіз впливу комплексу технологічних факторів, що впливають на міцність реакційно-порошкових бетонів .	81
1.6.3. Вплив температурних режимів твердіння на міцність реакційно-порошкових бетонів .....	96
1.6.4. Зерновий склад піску як заповнювача реакційно-порошкових бетонів .....	103
Висновки до розділу І .....	112
Література до розділу І. (п. 1-5) .....	115
<b>РОЗДІЛ ІІ. РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВИЙ ФІБРОБЕТОН .....</b>	<b>128</b>
2.1. Вплив виду і вмісту сталеві фібри та параметрів складу на міцнісні властивості реакційно-порошкових фібробетонів (РПФБ) .....	128
2.1.1. Вплив виду фібри на міцнісні показники РПФБ .....	128

2.1.2.	Вибір оптимального вмісту фібри .....	143
2.2.	Вплив складу реакційно-порошкового бетону на міцнісні властивості РПФБ .....	150
2.2.1.	Реакційно-порошкові фібробетони із композиційним дисперсним армуванням .....	162
2.2.2.	Вплив вмісту та співвідношення металевої та неметалевої фібри на міцність РПФБ .....	164
2.2.3.	Вплив факторів складу на міцність РПФБ з композиційним дисперсним армуванням .....	169
2.3.	Технологічні властивості фібробетонних сумішей.....	178
2.4.	Структурні особливості реакційно-порошкових фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням .....	191
2.5.	Усадочні деформації РПФБ .....	196
2.6.	Морозостійкість РПФБ .....	200
2.7.	Реакційно-порошкові бетони з дисперсним армуванням сталевими сітками .....	205
	Висновки до розділу II .....	214
	Література до розділу II. (п. 6-7) .....	218
<b>РОЗДІЛ III. БУДІВЕЛЬНІ СУМІШІ НА ОСНОВІ РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВИХ БЕТОНІВ</b>		221
3.1.	Реакційно-порошкові бетони як напівфабрикат для виготовлення сухих будівельних сумішей (СБС) для розчинів різного призначення .....	221
3.1.1.	Передумови використання РПБ у будівельних сумішах	221
3.1.2.	Дослідження впливу виду редиспергованого полімеру на властивості СБС .....	226
3.1.3.	Ремонтні суміші .....	230
3.1.4.	Гідроізоляційні суміші .....	244
3.1.5.	Поризовані та теплоізоляційні суміші .....	253
3.1.6.	Суміші для наливних підлог .....	263
3.2.	Конструкційно-теплоізоляційні бетони .....	273
3.2.1.	Склад і властивості керамзитобетонів .....	273
3.2.2.	Склад і властивості політиролбетонів .....	282
	Висновки до розділу III .....	398
	Література до розділу III. (п. 8-9) .....	300

## ВСТУП

На сучасному етапі розвитку будівельної технології для зведення відповідальних споруд, що знаходяться у складних умовах експлуатації, все ширше застосовуються бетони нового покоління. Відмінними їх особливостями є висока міцність та швидкість її зростання, довговічність, знижені значення питомої витрати цементу на одиницю міцності. Отримання таких бетонів передбачає перехід на багатокомпонентні суміші з включенням до їх складу добавок суперпластифікаторів та дисперсних високоактивних мінеральних добавок.

До бетонів нового покоління належать високофункціональні бетони «High Performance concrete» та їх різновид – «Реакційно-порошкові бетони» (“Reactive powder concrete”). На кафедрі технології будівельних виробів і матеріалознавства НУВГП з 2016 року досліджується комплекс питань, що стосується розробки технології бетонів нового покоління в прив’язці до сировинної бази України та конструктивних рішень відповідальних споруд.

В книзі наведені результати досліджень, що направлені на розробку технології високоміцних реакційно-порошкових бетонів, фібробетонів та будівельних сумішей різного призначення на їх основі. Вивчені властивості даних матеріалів із застосуванням поширеної техногенної сировини та добавок-модифікаторів, особливості структуроутворення та шляхи покращення властивостей, що дозволяють раціонально застосовувати розроблені бетони та розчини в будівництві.

# **РОЗДІЛ І**

## **ТЕХНОЛОГІЯ І ВЛАСТИВОСТІ РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВИХ БЕТОНІВ**

### **1.1. Загальні відомості**

Найбільш ефективним різновидом дрібнозернистого бетону, котрий володіє підвищеною однорідністю, міцністю та деформативністю є розроблений у Франції у 90-х роках 20 століття реакційно-порошковий бетон (РПБ) (Reactive Powder Concrete (RPC)) [1]. Для такого бетону типова міцність при стиску знаходиться у межах від 150 до 200 МПа, що в декілька разів перевищує міцність для звичайних бетонів [2]. За даними [3; 4; 5] РПБ при спеціальних умовах може досягнути підвищення міцності до 800...810 МПа. Як показують дані багатьох дослідників [3], для РПБ поряд високою міцністю характерний також високий показник тріщиностійкості, що характеризується співвідношенням міцності при стиску до міцності при згині. Такий показник для РПБ знаходиться у межах від 3,5 до 5 [2], тоді як традиційних високоміцних бетонах – 8...10 [1]. Поєднання надвисокої міцності та високої деформативності у реакційно-порошковому бетоні забезпечується додатково внаслідок дисперсного армування короткими сталевими волокнами [3; 6; 7; 8].

У складі РПБ не міститься крупний заповнювач. Замість нього використовуються дрібні порошки, такі як кварцовий пісок і мелений кварц з розмірами частинок від 0,045 до 0,6 мм. Як показано у роботі [3] термін "реакційно-порошковий" відображає той факт, що дисперсні компоненти в РПБ при твердінні проходять відповідні хімічні перетворення.

Основний принцип покращення властивостей бетону, реалізований у РПБ полягає в усуненні недоліків, що характерні для звичайного бетону [9; 10; 11].

Надвисокі механічні характеристики РПБ можна пояснити наступними їх особливостями:

1. Підвищенням однорідності РПБ шляхом усунення крупних заповнювачів;

2. Підвищенням щільності бетону шляхом оптимізації зернового складу суміші компонентів [3];

3. Покращенням властивостей цементуючої матриці шляхом додавання високоефективних пуцоланових добавок, таких як мікрокремнезем та за рахунок зменшення водо-в'язучого відношення [9; 11];

4. Формуванням щільної мікроструктури шляхом термообробки після твердіння [3].

Ефективність РПБ підтверджується даними про його використання у відповідальних спорудах. РПБ були використані при будівництві автомобільних [12; 13] та пішохідних мостів [9; 14; 15; 16; 56], а також багатьох інших проектів [4; 9; 16]. Завдяки підвищеній міцності, довговічності і радіаційній стійкості РПБ може бути використаний як надійний матеріал для контейнерів радіоактивних відходів атомних електростанцій [17]. Він також застосовується для термічного захисту будівельних конструкцій, оскільки забезпечує кращу вогне- та жаростійкість, ніж звичайний високоміцний бетон [18]. Дослідження свідчать про те, що РПБ дозволяє розширити можливості використання бетону при виготовленні нових тонкостінних конструкцій, виробництво яких раніше було неможливим [19]. Незважаючи на те, що виробничі витрати на РПБ є, в цілому, вищими, ніж для звичайних бетонів, все ж при використанні РПБ існують деякі економічні переваги. За рахунок застосування дисперсного армування короткими сталевими волокнами можливе повне або часткове усунення використання арматурних стержнів. За рахунок надвисоких механічних характеристик РПБ товщина бетонних елементів може бути зменшена, що призводить до економії матеріалів і витрат на виготовлення конструкції в цілому [20].

Незважаючи на багато переваг порівняно зі звичайними та високоміцними бетонами, РПБ не отримав розвитку в Україні навіть і при зведенні відповідальних споруд. Цьому сприяє недостатня вивченість технологічних параметрів його отримання, а також дефіцитність мікрокремнезему, який є одним з основних сировинних матеріалів, котрий забезпечує властивості РПБ.

Суттєвий прогрес у технології бетону на сучасному етапі став можливим в основному завдяки розвитку виробництва і застосування хімічних та мінеральних добавок, зокрема суперпластифікаторів та мікрокремнезему [1].

Згідно прийнятої класифікації бетон може бути поділений на класи за міцністю на стиск наступним чином: бетон з низькою міцністю, тобто такий, що має міцність при стиску менше 25 МПа; бетон зі звичайною міцністю, тобто з міцністю на стиск 25-50 МПа; високоміцний бетон, тобто бетон з міцністю на стиск 50-100 МПа, бетон з надвисокою міцністю вище 100 МПа.

Крім високої міцності, для будівництва необхідно щоб бетон характеризувався і іншими високими показниками, що визначають його технологічність і довговічність.

Високоякісний (високофункціональний) бетон (НРС) відноситься до бетонів із водоцементним відношенням менше 0,3-0,4, щоб отримати міцність при стиску до 70-100 МПа у 28-днів і 45-55 МПа на першу добу твердіння [8].

Ультрависокоміцний або надвисокоякісний бетон (UHSC або UHPC) є відносно новими матеріалами з міцністю на стиск більше 150 МПа, що також мають і інші покращені властивості [10]. UHSC поділяють на два основних види – це бетон без макродефектів (MDF) і реакційно-порошковий бетон (РПБ). MDF включає суміш цементу і водорозчинного полімера; інтенсивне змішування яких викликає механо-хімічну реакцію, що призводить до надвисокої міцності при розтягу, [9; 11], особливо при використанні глиноземистих цементів [12]. Основним недоліком цього бетону є те, що їх механічні властивості погіршуються після контакту з водою [13].

Для отримання РПБ використовуються [14; 15; 16] дрібні порошки, такі як кварцовий пісок, подрібнений кварц і мікрокремнезем з розміром частинок від 0,1 до 600 мкм. Розподіл зерен різних порошків ретельно оптимізується для досягнення підвищеної щільності матриці [9; 15]. Суперпластифікатор використовується для зменшення водо-в'язучого відношення (В/В) від 0,4-0,5 до 0,2 [9].

Властивості РПБ забезпечують йому багато переваг:



– Високі міцнісні показники дають можливість зменшити переріз і масу конструкцій. Зниження маси є суттєвою перевагою при виробництві більш тонких конструкцій, зручних до транспортування, що дозволяють зменшити загальні витрати і збільшити корисну площу в висотних будівлях [17];

– Висока деформативність і поглинання енергії забезпечують більшу надійність конструкції навіть при землетрусах [18; 19];

– Підвищена стійкість до стирання забезпечує тривалий термін служби поверхонь мостів та промислових підлог [20], в той час як підвищена корозійна стійкість забезпечує захист в районах із суворими кліматичними умовами [21];

– Значна кількість негідратованого цементу в готових конструкціях забезпечує здатність до самовідновлення при утворенні тріщин, [18];

– Дисперсність компонентів РПБ дозволяє отримати високу якість обробки поверхні, [18].

У зв'язку з тим, що РПБ містить значну кількість високодисперсних матеріалів технологія їх виготовлення вимагає спеціального способу перемішування, який, за даними деяких авторів [14; 19; 23; 56; 73-76] може полягати у наступному:

- спочатку, протягом 1...3 хвилин, змішують сухі інгредієнти до досягнення гомогенної суміші (на низькій швидкості);

- далі додають половину необхідної кількості води, що містить половину об'єму суперпластифікатора, і змішують при високій швидкості приблизно 3...5 хвилин;

- воду і суперпластифікатор, що залишилися, додають і перемішують протягом 5...8 хвилин (при високій швидкості).

Загальний час перемішування сумішей РПБ становить від 10 до 15 хвилин. За даними [14] для ефективного змішування необхідна досить висока швидкість (близько 30 оборотів в секунду). Швидкість змішування впливає як на час перемішування так і властивості РПБ. Після завершення процесу змішування РПБ виливають у сталеві форми і ущільнюють.

## 1.2. Застосування реакційно-порошкових бетонів (РПБ) при зведенні відповідальних конструкцій та захисних споруд

Нижче наведені основні напрямки реального застосування РПБ.

**Елементи конструкцій.** Існує ряд прикладів застосування РПБ для зведення елементів мостів (переважно пішохідних). Шербрукський пішохідний міст у Квебеку в Канаді був першою в світі великою спорудою, яка була побудована на основі РПБ [17]. Конструкція мосту являє собою ферму, що не містить звичайної арматурної сталі, натягнуту сталевими тросами. РПБ з міцністю на стиск 350 МПа залитий в тонкостінні труби з нержавіючої сталі для складання діагональних елементів. Ефективна товщина пішохідного мосту становить лише 150 мм. У роботі [22] показано, що така ж конструкція, яка була б побудована зі звичайного НРС, мала б товщину майже 400 мм. Пішохідний міст в Кореї Суньюдо у Сеулі є найбільшим РПБ мостом у світі з одним прольотом 120 м [16]. Міст також не містить звичайної арматури. Під час будівництва всі елементи конструкції були зібрані поруч з будівельним майданчиком в зоні, яка містила дозувальні установки, сталеву опалубку та камеру термічної обробки [16].

Пішохідний міст Саката-Мірай у Саката в Японії не містить жодної пасивної арматури. Він надзвичайно легкий з вагою всього 56 тонн, що становить приблизно одну п'яту від статичного навантаження еквівалентної звичайної попередньо напруженої бетонної конструкції [16; 24]. Технологія РПБ дозволяє будівельникам при зведенні пішохідних мостів оптимізувати використання матеріалу та реалізувати економічні переваги [18; 25]. У роботі [17] відмічається, що РПБ має значний потенціал для виготовлення збірних або попередньо-напружених конструкцій.

**Матеріали для безпеки.** Одним із напрямків можливого застосування РПБ є матеріали для захисту від різних руйнуючих впливів (постріли, вибухи, радіоактивні речовини тощо).

У роботі [18] було зроблено припущення, що РПБ-контейнери можуть бути використані як високощільні ємності

для небезпечних відходів внаслідок низької пористості РПБ, відмінних механічних характеристик і довговічності. У роботах [29] і [30] також відмічено, що РПБ може використовуватися як надійний контейнер для радіоактивних відходів АЕС. Відповідно до [31], очікується, що РПБ може застосовуватись у якості водонепроникних контейнерів з небезпечними рідинами через його дуже низьку проникність і високу стійкість до хімічних впливів [32].

У роботі [18] показано, що металеві сплави або композитні конструкції, які в даний час використовуються в охоронних системах банків, не задовольняють новим вимогам безпеки і ваги. Було запропоновано РПБ як нове покоління матеріалів для безпеки, які мають надзвичайно високу стійкість до проникнення і більшу економічність, оскільки можуть забезпечити захист, який можна порівняти з дорогими сплавами.



**Рис. 1.1.** Результат випробувань вибухом залізобетонних плит, підсилених і не підсилених за допомогою РПБ DUCON®

Дисперсно-армований РПБ, відомий під комерційною назвою DUCON® [22; 30; 33] використовується у захисних бетонних елементах проти динамічних впливів, таких як вибухи, бомбардування, удари або землетруси. Для використання РПБ як захисного бетону вирішальне значення має взаємозв'язок деформативних та міцнісних властивостей. За допомогою РПБ DUCON® можна ефективно підвищити захист будівель від

руйнівних дій за рахунок використання тонкостінних елементів. Такий бетон, завдяки високим деформативним властивостям значно менш чутливий до виду впливів, що діють на будівельну конструкцію. Встановлено, що дисперсно-армований РПБ витримує вибухи, бомбардування, землетруси та їх поєднання при товщині не більше 4...5 см. Такі характеристики були підтверджені і продемонстровані у багатьох випробуваннях і дослідженнях відомих університетів і установ [22; 30; 33]. У той же час завдяки високій текучості суміші РПБ придатний для виготовлення виробів різноманітних форм, що адаптує його до загальної архітектурної картини. Матеріал, отриманий за технологією DUCON®, використано для захисту об'єктів критичної інфраструктури, таких як посольства, хмарочоси, громадські центри, центри обробки даних високого рівня безпеки та атомних електростанцій.

Властивості матеріалу, такі як висока несуча здатність у поєднанні з надзвичайною деформативністю, дозволяють поглинати найбільш динамічні впливи. Порівняно із залізобетоном, завдяки своїй підвищеній стійкості дисперсно-армований РПБ дає можливість запроектувати конструкцію стійку до руйнування, товщина і маса якої у 2 рази нижча.



**Рис. 1.2.** Результати випробування залізобетонної плити (а) та плити з РПБ (б) шляхом контактної детонації

Використання дисперсно-армованого РПБ дозволяє також забезпечити захист людей від уламків бетонних конструкцій, що утворюються при вибухах чи інших динамічних впливах.

Великі приміщення з самонесучими перекриттями, такі як спортивні зали, громадські та виробничі приміщення, будівлі вимагають високих вимог до безпеки конструкцій. Стельові конструкції, виготовлені зі звичайного залізобетону, утворюють, у разі руйнування елементів (наприклад, при вибухах), небезпечні для людей та обладнання уламки. Підкріплення залізобетонних плит захисним шаром з РПБ може призвести до значного поліпшення безпеки. Випробування показали, що шари захисту від уламків, виготовлені з РПБ DUCON®, можуть поглинати локальні руйнування залізобетонних елементів при товщині шару до 1,5 см. Захисний шар дисперсно-армованого РПБ діє як захисна сітка, що запобігає падінню уламків. Таким чином, забезпечується успішний захист людей та високочутливих систем (рис. 1.1-1.3).



**Рис. 1.3.** Залізобетонна плита із захисним шаром РПБ, для захисту від утворення уламків при руйнуванні

Наведені дані свідчать про ефективність застосування тонкошарових елементів, виготовлених з РПБ в елементах захисних та фортифікаційних споруд.

### 1.3. Вплив матеріалів та технологічних параметрів на властивості РПБ

**Цемент.** Так як вміст цементу в РПБ, як правило, досягає 700-1200 кг/м<sup>3</sup> [22; 30; 33], вибір цементу може бути критичним фактором, що впливає на якість РПБ. Для РПБ необхідний низький вміст у цементному клінкері С<sub>3</sub>А [31]. Тому для нього часто використовують сульфатостійкий цемент. Високий вміст цементу у складі РПБ призводить до утворення великої кількості теплоти під час гідратації і до термічного розтріскування [1]. Більш того, великий об'єм цементного тіста може викликати значні усадочні деформації та набрякання при зміні вологості бетону. Для подолання вказаних проблем прийнятним рішенням може бути часткова заміна цементу мінеральними добавками у складі РПБ.

**Мікрокремнезем.** Відомо, що використання високодисперсного діоксиду кремнію може значно поліпшити механічні властивості та довговічність бетону, а також мікроструктуру цементного каменю за рахунок пуцоланової реакції з продуктами гідратації [34]. Тому, мікрокремнезем, будучи реакційно-активним порошком, є важливим компонентом РПБ. Мікрокремнезем є побічним продуктом процесу виробництва феросиліцію. Він містить 98% чистого SiO<sub>2</sub> і має питому поверхню до 25 м<sup>2</sup>/г, що майже у 80 разів більше, ніж портландцементу [35]. Підвищений вміст аморфного діоксиду кремнію SiO<sub>2</sub> і висока дисперсність є основними причинами його високої пуцоланової активності. Розмір частинок мікрокремнезему 0,1...1 мкм, що в 10...100 разів менше, ніж розмір зерен цементу [10; 36; 37]. При гідратації він утворює низькоосновні гідросилікати C-S-H, що є результатом його взаємодії з Ca(OH)<sub>2</sub>. На думку багатьох дослідників [4; 19; 38; 74; 78; 79] мікрокремнезем сприяє мікрозаповненню пустот між зернами цементу, покращенню реологічних характеристик внаслідок ідеально сферичної форми частинок, і дозволяє отримати вторинні гідрати пуцолановою реакцією з вапном, що утворюється в результаті гідролізу клінкерних мінералів.

Гідроксид кальцію, що утворюється при гідратації цементу, займає 20...25% від об'єму продуктів гідратації [39]. Додаткові гідросилікати кальцію (C-S-H), сформовані в цементній матриці викликають її зміцнення і ущільнення, підвищення однорідності структури бетону [35]. Враховуючи ефект наповнювача, оптимальна частка мікрокремнезему становить близько 30% цементу [7].

**Мелений кварц.** Наявність дрібних частинок мінеральних домішок у бетонній суміші призводить до значного покращення реологічних властивостей, таких як зв'язність і легкоукладальність [4]. Розшарування є основним джерелом неоднорідної мікроструктури гідратованого цементного тіста [4]. Мелений кварц допомагає зменшити водовідділення і розшарування бетонної суміші. У роботі [42] показано, що подрібнений кристалічний кварцовий порошок з середнім розміром частинок 10 мкм (такий же за розміром як цемент) є важливим інгредієнтом, особливо для термічно обробленого РПБ. Додатковий кремнезем, який входить в подрібнений кварц, сприяє зменшенню співвідношення  $\text{CaO/SiO}_2$  в'язучого. Мелений кварц з середнім розміром частинок 10...15 мкм, особливо активується при температурах близьких до 250° С [63].

**Суперпластифікатори.** Використання хімічних добавок стало однією з найважливіших складових сучасної технології бетону [4; 43]. Досвід показує, що найбільш ефективними СП є диспергуючі речовини на основі поліакрилату, але вони спричиняють деяке прискорення, яке є проблемою для практичного застосування. Найважливішою розробкою останніх років, що має суттєвий вплив на технологію отримання ультрависокоміцних бетонів є суперпластифікатори на основі полікарбоксилатних ефірів. У роботі [74] відмічається, що полікарбоксилатний ефір є найкращим варіантом сповільнюючого суперпластифікатора для надміцного бетону. Показано [40], що водний модифікований карбоксилат Sika ViscoCrete-5 є найбільш ефективним суперпластифікатором для РПБ за рекомендацією компанії Sika.

**Дисперсне армування.** Висока крихкість є одним з найбільших недоліком бетонів, високоміцних бетонів [45]. За рахунок включення дисперсних волокон у матрицю РПБ деформативність суттєво підвищується [4; 19; 46]. Згідно [77] і [4; 17], додавання невеликої кількості волокон (в межах 1...6% за об'ємом) до бетонної суміші має відносно незначний вплив на міцність але суттєво підвищує ударну в'язкість бетону.

Оптимальною кількістю сталюї фібри з економічної точки зору є 2% за об'ємом. Встановлено, що міцність на згин відносно міцності при стиску зростає зі збільшенням вмісту сталевих волокон. При цьому позитивно впливає підвищення відношення довжини до діаметру ( $L/D$ ) сталевих волокон.

**Упаковка частинок.** У багатьох роботах [19] показано, що якість РПБ сильно залежить від упаковки заповнювача. Як видно з досліджень [48], висока міцність і низька пористість РПБ були отримані шляхом оптимізації упаковки частинок. Щоб поєднати високу міцність бетону з легкоукладальністю, як показано в роботі [49] необхідно збільшити частку дрібних частинок, щоб відокремити крупні і дозволити їм рухатися одна відносно одної.

Для заповнення проміжку між частинками цементу з розміром 80...100 мкм і мікрокремнезему (0,1...1 мкм) у якості мікронаповнювача може бути використаний кварцовий (чи інший) порошок діаметром близько 10...50 мкм [10]. Таким чином здійснюється розподіл зерен цементу, мікрокремнезему та кварцового порошку [49]. Загалом, чим вища щільність упаковки, тим меншою буде кількість води, необхідної для заповнення порожнин між частинками, і кращою буде якість бетонної суміші [1]. Встановлено [10], що збільшення щільності упаковки частинок зменшує пористість контактної зони, збільшує довговічність бетону при однаковому В/Ц, покращує зв'язність бетонної суміші, знижує ймовірність її розшарування.

**Водо-цементне відношення.** Міцність і легкоукладальність бетонної суміші залежить від водо-в'язучого (В/В) або водоцементного (В/Ц) бетонної суміші [1]. Показник В/Ц зазвичай замінюється у РПБ на В/В, щоб



урахувати вплив мікрокремнезему та кварцового порошку на набір міцності [26].

РПБ вимагає більшої кількості суперпластифікатора порівняно з бетоном типу НРС [19]. Без додавання суперпластифікатора (СП) зерна цементу зазвичай флокулюються у цементному тісті при додаванні води. При додаванні СП, цементні зерна розподіляються рівномірно по всій матриці, і текучість цементного тіста підвищується. Як наслідок, для підтримання такого ж рівня легковкладальності може знадобитися менше води [50]. У роботах [10; 36] зазначено, що оптимальною для РПБ кількістю полікарбоксилатного суперпластифікатора є 1,6% від вмісту цементу і більше. Передозування суперпластифікатора може призвести до проблем з хімічною несумісністю компонентів бетону та надмірного уповільнення часу тужавлення [1].

**Інтенсивність перемішування.** У роботі [51] стверджується, що інтенсивне змішування може підвищувати текучість сумішей на дрібних порошках. Також за результатами досліджень [25] встановлено, що в'язкість цементного тіста при механічному перемішуванні зменшується при збільшенні часу змішування. Одним із способів збільшення інтенсивності перемішування є використання змішувачів з більш високою швидкістю. Для ефективного руйнування дисперсних агломерованих частинок РПБ слід використовувати змішувачі зі швидкістю не менше 30 обертів в секунду [50].

**Легкоукладальність.** У роботі [51] була досліджена суміш РПБ при В/Ц=0,13, котра була високов'язкою і характеризувалась нульовою осадкою конуса. Таку суміш було досить незручно перемішувати і вона була мало придатна для формування виробів складної конфігурації. У роботі [40] підвищена текучість суміші була забезпечена при В/В=0,3. Встановлено [10], що текучість суміші РПБ підвищувалась при заміні цементу кварцовим порошком. Експериментальні результати показали, що розплив конуса збільшується з 51 до 62 см, при умові коли 30% цементу замінюється кварцовим порошком. Це пояснюється зменшенням порожнин у суміші за рахунок введення дрібного кварцового порошку.

**Густина.** Зазвичай РПБ характеризуються середньою густиною від 1760 до 2410 кг/м<sup>3</sup>, [52]. Густина збільшується зі збільшенням тиску пресування, але зменшується зі збільшенням температури термообробки [4; 10]. У роботі [4; 10] було встановлено, що збільшення вмісту мікрокремнему знижує густину РПБ, що пояснюється частковим заповненням простору, зайнятого цементом.

**Міцність на стиск.** Висока міцність РПБ головним чином пояснюється підвищенням однорідності шляхом усунення крупних заповнювачів; підвищенням густини шляхом оптимізації гранулометричного складу суміші і пресуванням; покращенням властивостей матриці шляхом додавання пуцоланових добавок, таких як мікрокремнезем; підвищенням щільності матриці та швидкості гідратації за рахунок зменшення В/Ц; поліпшенням мікроструктури шляхом термообробки після твердіння [53]. Міцність при стиску РПБ тісно пов'язана з кінетикою гідратації [54]. Висока міцність забезпечується при досягненні певного ступеня гідратації та низькому В/Ц. Частинки негідратованого цементу та мікрокремнезему сприяють покращенню механічних властивостей бетону на рівні мікроструктури [52].

Тиск пресування зазвичай підвищує міцність при стиску, однак перевищення значень пресуючого тиску за 100 кН, призводить до зниження міцності за рахунок внутрішніх напружень і розвитку мікротріщин.

Міцність РПБ суттєво залежить від термічної обробки [55]. У роботі [36] вивчали вплив температури на механічні властивості РПБ і виявили, що міцність при стиску швидко зростає при температурах від 23 до 150° С внаслідок прискорення процесу гідратації і знову підвищується між 200 і 300° С внаслідок пуцоланової реакції кварцу, що викликає утворення дуже щільних гідратів силікату кальцію (C-S-H) у вигляді ксонотліту.

**Модуль пружності.** У роботі [4] було показано, що РПБ має значення модуля Юнга, що перевищує 50 ГПа, і може досягати 75 ГПа для тих композицій, що мають максимальну густину. У роботі [49] встановлено, що модуль пружності РПБ

збільшується непропорційно до міцності на стиск залежно від термінів твердіння. Це добре узгоджено з дослідженням [56], у якому було визначено міцність на стиск РПБ і модуль пружності Юнга та взаємозв'язок між ними.

**Морозостійкість та водонепроникність.** РПБ добре працює в умовах заморожування і відтавання [50] і [57]. Встановлено, що коефіцієнт довговічності в кінці випробування (300 циклів) завжди дорівнює або перевищує 100% для всіх сумішей.

На проникність впливають два основних фактори: пористість, наявність сполучених пор в цементному тісті і мікротріщини в бетоні, особливо біля поверхні заповнювачів [58]. Пористість і характер пор визначаються, головним чином, В/Ц, ступенем гідратації та ступенем ущільнення [59]. У роботах [60; 61] були виконані дослідження на проникнення води у високоміцний бетон. Встановлено, що додавання мікрокремнезему зменшило проникнення води порівняно з звичайними бетонами. Також показано, що проникнення води у високоміцні бетони пов'язано з міцністю на стиск.

**Усадка.** У ранньому віці основними видами усадки РПБ є аутогенна, термічна і повітряна усадки. Деякі інші види усадки, наприклад, карбонізаційна, дуже мало впливають на загальне зменшення розмірів в ранньому віці і ними можна знехтувати [62]. Поява аутогенної усадки безпосередньо пов'язана з гідратацією цементу. Це макроскопічне зменшення об'єму цементних матеріалів при гідратації цементу після первинної укладки. Воно починає розвиватися рівномірно і ізотропно у перші години після формування бетону (до 24 годин).

Під час твердіння бетону під впливом сухого середовища починає розвиватися повітряна усадка [63]. У роботі [64] було встановлено, що як В/Ц, так і введення мікрокремнезему мають значний вплив на аутогенну усадку бетону. Зі зменшенням В/Ц і збільшенням вмісту мікрокремнезему аутогенна усадка зростає. Це узгоджується з іншими дослідженнями [65-67]. У роботі [62] стверджується, що усадка у ранньому віці призводить до появи поверхневих тріщин і утворення зародків тріщин, які проявляються на більш пізніх стадіях. Поряд з цим у роботі [49]

відмічено, що ультрависокоміцний бетон (УНРС), як правило, має більш високу аутогенну усадку, ніж звичайний НРС. Високий вміст цементу та низьке В/Ц в УНРС може призвести до високої аутогенної усадки і, відповідно, до утворення мікротріщин у ранньому віці.

В роботі [61] визначали повітряну усадку сушінням високоміцного бетону з мікрокремнеземом. Встановлено, що додавання 5 і 10% мікрокремнезему призвело до істотного зменшення повітряної усадки. Це пояснено тим, що нижчі значення усадки бетонів, пов'язані з більшою щільністю цементного тіста внаслідок використання мікрокремнезему та уповільнення випаровування води. Ці висновки узгоджуються з роботою [68], у якій відмічено, що зразки, які містять мікрокремнезем характеризуються нижчою усадкою при тих же значеннях В/Ц. Також у роботі [69] встановлено, що при підвищенні вмісту мікрокремнезему з 8% до 15% спостерігається зниження усадки на 9%.

#### **1.4. Мета і основні задачі досліджень**

Отримання РПБ зі стабільними характеристиками, що придатний для промислового виготовлення, потребує використання підвищеної кількості дефіцитних матеріалів, перш за все таких як мікрокремнезем, а також високоефективні добавки-гіперпластифікатори, які в Україні практично не виготовляються. Таким чином, актуальним і своєчасним завданням є розробка технологічних рішень отримання РПБ з підвищеною тріщиностійкістю і динамічною міцністю з використанням сировинних компонентів, доступних в Україні. Вирішення цієї проблеми потребує виконання задач, що сформульовані нижче.

1. Розробити теоретичні передумови формування властивостей реакційно-порошкових бетонів з підвищеною тріщиностійкістю та динамічною міцністю.

2. Експериментально обґрунтувати склади реакційно-порошкових бетонів для захисних споруд.

3. Дослідити вплив температурних режимів твердіння на

міцність реакційно-порошкових бетонів.

4. Дослідити будівельно-технічні властивості реакційно-порошкових бетонів, що визначають його захисну здатність і довговічність.

5. Розробити технологічні параметри отримання і властивості реакційно-порошкових фібро бетонів.

6. Розробити комплекс сухих будівельних сумішей на основі базових композицій реакційно-порошкових бетонів.

## **1.5. Теоретичні передумови формування властивостей реакційно-порошкових бетонів**

### **1.5.1. Вплив структурних особливостей РПБ на його міцність**

Основні структурні особливості РПБ – його високий рівень щільності і однорідності, у відповідності зі структурною теорією міцності бетону позитивно впливають на міцність [50].

Розвиток структурної теорії міцності бетону почався наприкінці XIX сторіччя після встановлення Р. Фере залежності міцності бетону від відносної густини цементного тіста, модифікованої пізніше Т. К. Пауерсом з врахуванням ступеня гідратації цементу в міру його твердіння. Залежність Р. Фере стала основою для розробки Д. Абрамсом закону (правила) водоцементного відношення – основної закономірності, що використовується при розрахунково-експериментальному проектуванні складів бетону.

За Пауерсом міцність при стиску зразків різного віку з цементного каменю, приготованих при різному водоцементному відношенні і твердіючих у нормальних температурних умовах, відповідає емпіричному рівнянню:

$$R = AX^n, \quad (1.1)$$

де  $X$  – відношення об'єму цементного гелю до суми об'ємів гелю і капілярного простору;

$A$  – коефіцієнт, який характеризує міцність цементного гелю;

$n$  – константа, яка в залежності від характеристики цементу складає від 2,6 до 3.

Параметр  $X$  можна розглядати як відносну густину цементного каменю. Представляючи залежність (1.1) через пористість  $\Pi$  можна записати:

$$R = A(I - \Pi)^n. \quad (1.2)$$

Крім залежностей типу (2.6) отриманий також ряд емпіричних рівнянь типу:

$$R = \sigma_0 \exp(-B\Pi), \quad (1.3)$$

де  $\sigma_0$  – міцність при нульовій пористості,

$B$  – константа.

Розрахункові дані, отримані з рівняння (1.3), добре узгоджуються з експериментальними при низькій пористості.

Д. Рой та Г. Гоуда успішно застосували рівняння подібне (1.3) для портландцементних систем з високою міцністю і низькою пористістю.

При заміні пористості на величину відносної густини  $d=1-\Pi$  формула (1.2) набуває виду:

$$R = \sigma_0 d^n. \quad (1.4)$$

З параметром  $d$  однозначно зв'язана величина водоцементного відношення ( $B/C$ ):

$$d = \frac{1 + 0,25\alpha\rho_u}{1 + \rho_u \cdot B/C}, \quad (1.5)$$

де  $\alpha$  – ступінь гідратації цементу;

$\rho$  – густина цементу.

Перші розрахункові залежності для міцності високоміцних бетонів ВМБ були запропоновані Б. Г. Скрамтаєвим та Ю. М. Баженовим, які, ґрунтуючись на, в цілому, нелінійному характері залежності міцності бетону від  $C/B$ , після широких експериментальних досліджень запропонували формулу при  $C/B \geq 2,5$  [67]:

при  $C/B \geq 2,5$

$$f_{cm} = A_1 R_c (C/B + 0,5). \quad (1.6)$$

Значення коефіцієнта  $A_1$  залежать від якості вихідних матеріалів.

Матеріали для бетону:	$A_1$ ;
високоякісні	0,43;
рядові	0,4;
пониженої якості	0,37.

Для більш повного врахування факторів, що впливають на міцність бетону, коефіцієнт  $A$  можна виразити добутком  $pA = A \cdot A_1 A_2 \dots A_n$ , де  $A_1 \dots A_n$  – додаткові коефіцієнти, що враховують вплив на міцність бетону температури, тривалості тверднення, добавок та ін.

Можливості розрахункових формул міцності бетонів суттєво збільшуються при використанні «приведеного»  $C/B$ :

$$(C/B)_{np} = \frac{V_c + K_{c,e} V_n}{B + \Pi_3 V_3 + V_{ne}}, \quad (1.7)$$

де  $K_{c,e}$  – коефіцієнт «цементуючої ефективності» або «цементний еквівалент» мінеральної добавки (наповнювача), що вводиться в бетонну суміш для економії цементу;

$V_c$ ,  $V_n$ ,  $V_{ne}$  – абсолютні об'єми відповідно цементу, мінерального наповнювача та повітря.

При використанні параметра  $(C/B)_{np}$  відкривається можливість розробки досить простих універсальних методик розрахунку складів важких і легких бетонів, що будуються на однакових фізичних передумовах.

Формула міцності бетону залежно від  $(C/B)_{np}$  має загальний вид:

$$f_{cm} = p A f_c ((C/B)_{np} + e), \quad (1.8)$$

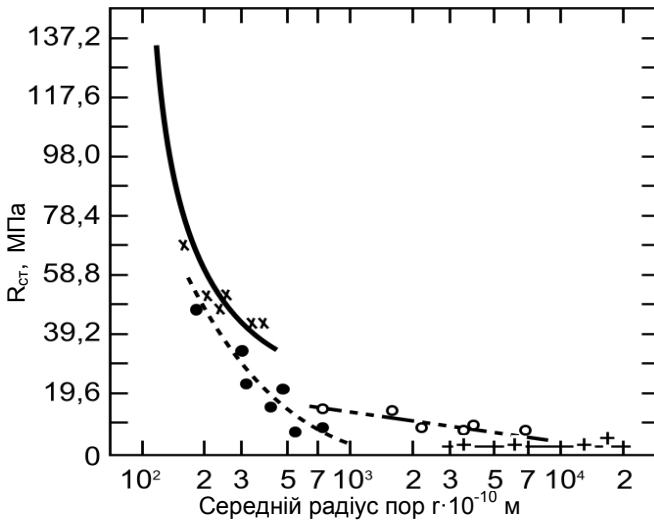
де  $p A_i$  – мультиплікативний коефіцієнт ( $p A_i = A_1 A_2 \dots A_n$ ), який враховує ряд технологічних факторів, що впливають на міцність бетону при постійному  $(C/B)_{np}$ , вік бетону, температурно-вологісні умови тверднення та ін.

Застосування «приведеного» Ц/В є раціональним, особливо, для розрахунку складів бетонів при введенні дисперсних мінеральних наповнювачів. При відсутності у бетоні мінеральних добавок формула (1.8) трансформується у формулу звичайного виду.

Експериментально показано, що при заданій пористості цементного каменю чим менший розмір пор, тим вище міцність (рис. 1.4).

Основне вихідне посилення сучасних структурних теорій полягає в тому, що бетон являє собою неоднорідне гетерогенне тіло.

Наявність пор і тріщин – невід'ємна особливість будови бетону. Як тріщини при визначеному масштабному рівні можуть прийматися капілярні й інші пори.



**Рис. 1.4.** Взаємозв'язок між міцністю при стиску  $R_{ct}$  та середнім розміром пор цементного каменю

Зародження тріщин пов'язують, як правило, з переміщенням і видозміною дислокацій у кристалічних ґратках. Для гетерогенного матеріалу на зародження тріщин визначальний вплив мають об'ємні деформації, розбіжність



температурних і вологісних деформацій окремих компонентів, стиснені деформаційні ефекти, седиментаційні явища, температурні і вологісні градієнти, осмотичні явища, корозійні впливи середовища експлуатації.

Процес руйнування бетону може розглядатися як розвиток тріщин, що виникають, як правило, на контакті матриці (цементний камінь) і заповнювача при виготовленні і твердінні бетону до їхнього злиття в наскрізні тріщини. Коли міцність заповнювача не перевищує міцність матриці, тріщини можуть поширюватися й у зерна заповнювачів.

Дослідження, виконані Ю. М. Баженовим, А. Ф. Щуровим і В. М. Мамаєвським із залученням електронного скануючого мікроскопу і малокутової рентгенографії, показали, що процес руйнування бетону починається з зародження і розвитку мікротріщин відколу в кристалітах гідросилікатів – продуктів твердіння цементу, які розташовані поблизу концентраторів напружень (пор і інших технологічних дефектів). Поширення тріщин від одного зерна до іншого до остаточного макроруйнування стає можливим, коли вільна пружна енергія є достатньою не тільки для утворення нових поверхонь магістральної тріщини, але і для компенсації додаткової роботи, яка іде на пластичні деформації та утворення східчастих поверхонь відколу. Умова поширення тріщини в полікристалічних матеріалах виражається рівнянням Гріффітса-Орована:

$$\sigma = \sqrt{E\nu / d_{cp}} = kd_{cp}^{-1/2}, \quad (1.9)$$

де  $\sigma$  – напруження;

$E$  – модуль пружності;

$\nu$  – ефективна енергія руйнування;

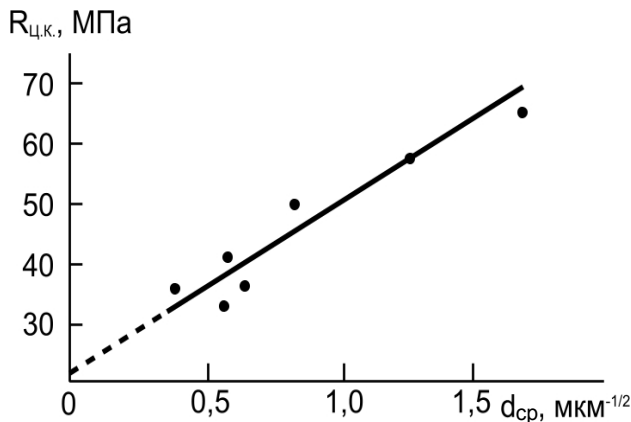
$d_{cp}$  – середній розмір кристаліта;

$k = (E\nu)^{-1/2}$  – коефіцієнт в'язкості руйнування.

Для пористих тіл у формулу (1.9) необхідне введення коефіцієнтів, що враховують пористість і інші дефекти. Експериментально підтверджена залежність (1.9) (рис. 1.5) показала істотний вплив на міцність цементного каменю дисперсно-кристалітної структури гелю гідросилікатів, якою

можна керувати, змінюючи умови твердіння, вводячи різні модифікуючі добавки і т.п.

За гіпотезою О. Є. Шейкіна міцність і ряд інших фізико-механічних властивостей бетону залежать від відношення абсолютного об'єму, зайнятого кристалічним зростком в одиниці об'єму цементного каменю, до абсолютного об'єму гелю. Вказане відношення, в основному, обумовлене мінералогічним складом цементу. Гіпотеза Шейкіна не передбачає утворення і розвиток мікротріщин відриву і не виявляє роль заповнювачів.



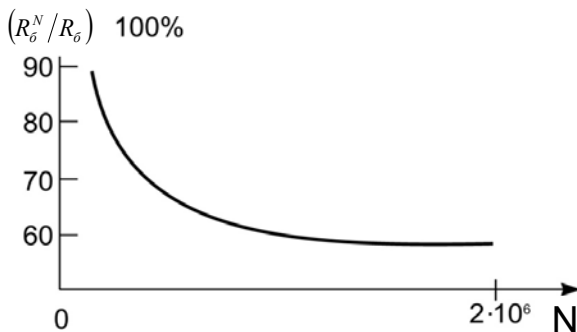
**Рис. 1.5.** Залежність міцності цементного каменю  $R_{ц,к}$  від середнього розміру кристалітів  $d_{ср}$  (за Ю. М. Баженовим)

О. О. Гвоздєв, аналізуючи експериментально встановлені факти утворення мікротріщин розриву, зв'язав їх з аналізом полів напружень у бетоні. Поле напружень, викликане навантаженням, взаємодіє з полем напружень, викликаним неоднорідністю матеріалу, в результаті чого виникають місцеві концентрації напружень, які приводять до тріщин розриву. Як показали дослідження О. Є. Десова, напруження в місцях концентрації в кілька разів перевищують напруження, викликані навантаженням.

При багаторазово повторюваній (циклічній) дії навантаження мікротріщини в бетоні виникають задовго до руйнування, яке має т.зв. втомлюванісний характер. Цей процес протікає більш інтенсивно, ніж у випадку статичного навантаження. При дії статичного навантаження місцеві перенапруження можуть релаксувати внаслідок прояву в'язких властивостей матеріалу, вирівнювання полів напружень і деформацій.

При багаторазових високочастотних (вібраційних) навантаженнях зменшуються в'язкі зв'язки, підвищується температура в мікрооб'ємах бетону, що сприяє тріщиноутворенню.

Здатність бетону чинити опір втомлюванісному руйнуванню характеризує його витривалість (рис. 1.6).



**Рис. 1.6.** Схема залежності відносної межі витривалості бетону від кількості циклів навантаження  $N$ :

$R_\sigma^N, R_\sigma$  – відповідно міцність бетону через  $N$  циклів та початкова міцність

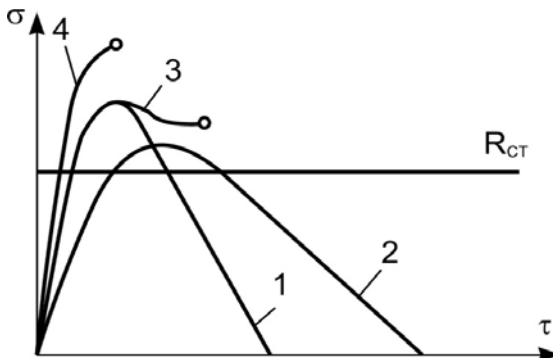
Безпечне напруження, при якому бетон може сприймати багаторазово повторюване навантаження протягом практично необмеженого часу, називається межею втоми  $\sigma_v$ . Величина відносної границі витривалості  $K_v$  ( $K_v = \sigma_v / R_{ct}$ ) залежить від структури бетону, виду й особливостей вихідних матеріалів, умов твердіння і віку бетону. Так, за даними І.М.Грушко в залежності від виду заповнювачів через 1 млн циклів  $K_v$

коливається від 0,7 до 0,38. Відносна межа (коефіцієнт) витривалості практично лінійно пов'язана із відношенням міцностей на розтяг або згин і стиск.

Збільшення цього співвідношення, що характерне для РПБ, повинно збільшити і відносну межу його витривалості.

Вплив пульсуючого і вібраційного навантаження характерний для конструкцій мостів, дорожніх покриттів, шпал, фундаментів під устаткування, підкранових колій та ін. Такі навантаження звичайно носять динамічний характер, оскільки час зміни навантаження від мінімальних до максимальних значень вимірюється частками секунди. Динамічний характер носить руйнування бетону при сейсмічному впливі. Опір бетону дії сейсмічного навантаження характеризується коефіцієнтом сейсмостійкості – відношенням фактичного значення критичного прискорення збудовуючої сили, яка викликає руйнування, до величини межі міцності. За інших рівних умов кращий опір сейсмічному впливу чинять також бетони з високим співвідношенням міцності на розтяг до міцності на стиск.

Поряд з багаторазовим у певних умовах бетон може зазнавати однократного динамічного навантаження. Воно викликається вибуховим, ударним, одноразовим рухливим та деякими іншими навантаженнями (рис. 1.7).



**Рис. 1.7.** Режими динамічного навантаження бетону (напруження  $\sigma$  – час  $\tau$ ) при яких він не зруйнувався 1, 2 і зруйнувався 3, 4

Ю. М. Баженов поділяє однократні динамічні навантаження на три види:

- загального характеру, коли напруження в бетоні зростає до максимальних значень за  $0,01 \dots 1$  с;
- ударні – при часі навантаження меншим за  $0,01$  с з і досить нерівномірним за об'ємом напруженим станом;
- вибухові, які характеризуються особливо високою швидкістю навантаження, що викликає місцеві перевантаження і руйнування бетону.

Головним показником, який визначає поведінку бетону при динамічному навантаженні служить коефіцієнт динамічного зміцнення  $K_{д.з}$ , тобто відношення міцності бетону при динамічному навантаженні до його статичної міцності. Динамічна міцність бетону особливо чутлива до наявності дефектів і мікротріщин у бетоні і насамперед у контактній зоні. Зі збільшенням дефектності структури бетону в міру підвищення В/Ц динамічна міцність бетону знижується більш помітно, ніж знижується його статична міцність.

Коефіцієнт динамічного зміцнення пов'язаний з часом навантаження  $\tau$  залежністю типу:

$$K_{д.з} = a - b \lg \tau, \quad (1.10)$$

де  $\tau$  – час навантаження;  $a$  і  $b$  – емпіричні коефіцієнти.

При навантаженні бетону за  $1$  с  $K_{д.з}$  зростає на  $15 \dots 30\%$ , а за  $0,03$  с вже на  $30 \dots 50\%$ .

До особливостей структури РПБ відносяться підвищений вміст цементного каменя і високий рівень зчеплення його з наповнювачем [50].

Відповідно до гіпотези О. Є. Шейкіна [67] міцність бетону при осьовому стиску визначається граничною розтягуваністю кристалічного зростку цементного каменя в напрямку, нормальному до дії зовнішньої сили, однак при збереженні зчеплення із заповнювачами. Вона може бути описана наступним рівнянням:

$$R_{\sigma} = \frac{R_{ц.к}}{1 - \frac{(\mu_{ц} E_3 - \mu_3 E_{ц.к})(1 - \Theta) q_3}{(E_{ц.к} q_{ц} + E_3 q_3) \mu_{ц}}}, \quad (1.11)$$

де  $R_{ц.к}$  – міцність цементного каменю;

$\mu_{ц}$ ,  $\mu_3$  – коефіцієнти Пуассона (коефіцієнти поперечних деформацій) цементного каменю і заповнювачів;

$\Theta$  – коефіцієнт проковзування при частковому порушенні зчеплення цементного каменю із заповнювачами;

$q_{ц}$  і  $q_3$  – об'єми цементного каменю і заповнювачів в одиниці об'єму бетону;

$E_{ц.к}$  й  $E_3$  – модулі пружності цементного каменю і заповнювача.

З формули (1.11) випливає, що в залежності від пружних характеристик заповнювачів і їхнього зчеплення з цементним каменем міцність бетону може бути більшою або меншою міцності цементного каменю. При максимальній міцності бетону зчеплення заповнювачів з цементним каменем не порушене ( $\Theta=0$ ). Якщо власна міцність заповнювачів не менше міцності цементного каменю, то вона не здійснює безпосереднього впливу на міцність бетону. При всіх рівних умовах міцність бетону тим більша, чим більший модуль пружності крупного заповнювача і краще його зчеплення з цементним каменем.

Й. М. Ахвердовим, для виявлення зв'язку між міцністю бетону і механічними властивостями заповнювача, використана термодинамічна теорія міцності твердих тіл. Пружна енергія ( $W$ ), яка витрачається на утворення нових поверхонь при руйнуванні, пропорційна квадрату міцності бетону:

$$W = R_{\sigma}^2 / 2. \quad (1.12)$$

Розв'язавши диференціальне рівняння в межах зміни об'ємних концентрацій компонентів двохкомпонентної моделі бетону і виконавши перетворення, Й. М. Ахвердов одержав формулу міцності бетону як функцію міцності розчину  $R_p$  і об'ємної концентрації заповнювача  $V_3$ :

$$R_{\sigma} = R_p \left( 1 - \frac{\alpha_{np}}{2} K_3 V_3 \right), \quad (1.13)$$

де  $\alpha_{np}$  – коефіцієнт, що визначає вплив структурної неоднорідності матриці і міцності зчеплення,

$K_3$  – коефіцієнт, що залежить від ступеня насичення бетону крупним заповнювачем.

Підвищена структурна однорідність РПБ як впливає з формули (1.13) позитивно відбивається на його міцності.

### **1.5.2. Вплив активних мінеральних наповнювачів на структуроутворення і властивості бетону**

Особливістю РПБ, що суттєво впливає на його властивості, є наявність в його складі активного дисперсного наповнювача. Значною мірою доцільність ефективного введення наповнювачів у цементні системи впливає з відомих уявлень, запропонованих В. М. Юнгом [70], про цементний камінь як "мікробетон", в якому роль матриці виконує гідратна фаза, отримана при хімічній взаємодії з водою зерен цементу менше 30 мкм, а роль наповнювача – більш крупні зерна цементу, які гідратуються лише з поверхні. При забезпеченні досить високої тонкості помелу клінкерної складової, виходячи з цієї концепції, частину зерен цементу можна замінити дисперсними матеріалами, в т.ч., які не вступають в хімічну взаємодію з водою. Ще у 1930 р. П. П. Будніков і М. І. Некріч запропонували [71] менш «концентрований» цемент, вводячи в нього карбонатні добавки. Вони прийшли до висновку, що зазначені добавки в певній кількості (не менше 10%) не викликають різкого падіння міцності. Позитивний ефект наповнювачів дослідники [72; 73; 74] пов'язували з т.зв. «ефектом дрібних порошків», які розширюють вільний простір, в якому осідають продукти гідратації цементу, що прискорює процес твердіння.

Доцільність введення наповнювачів до складу бетонів і розчинів впливає також з необхідності забезпечити їх достатню щільність без перевитрати цементу. За даними П. І. Боженова [75] для заповнення пустот між зернами заповнювача може

витрачатися більше 60% в'язучого, при цьому активно бере участь у формуванні клейового прошарку лише менша частина в'язучого. Отримання суміші заповнювачів з мінімальною пустотністю є складним техніко-економічним завданням, вона вимагає застосування великого числа фракцій. Більш перспективним є збільшення загальної витрати порошкоподібної частини цементних композитів за рахунок розбавлення цементу мінеральними наповнювачами, введення яких можливе як в процесі отримання цементу, так і отриманні розчинових або бетонних сумішей у стані готовому до вживання або в сухому вигляді.

Мінеральні наповнювачі в цементних системах часто умовно поділяють на активні та інертні [76]. До активних відносять дисперсні мінеральні речовини, які здатні взаємодіяти з гідроксидом кальцію, що виділяється при гідролізі клінкерних мінералів (т.зв. активні мінеральні добавки). До активних наповнювачів відносять також карбонатні порошки, які взаємодіють з цементом, з утворенням комплексних сполук типу гідрокарбоалюмінатів [77; 78]. У світі сучасних теоретичних уявлень про структуроутворення цементних систем другу групу мінеральних наповнювачів, які не вступають безпосередньо в хімічну взаємодію з продуктами гідратації цементу неточно називати інертними. Вони активно впливають на фізико-хімічні процеси структуроутворення та синтезу властивостей розчинів і бетонів.

Більш прийнятною є класифікація мінеральних наповнювачів, запропонована Ю. М. Баженовим, В. С. Дем'яноюю і В. І. Калашниковим [79] залежно від ступеня їх активності. Відповідно до цієї класифікації наповнювачі ділять на 4 групи:

I група – повільно твердіючі дисперсні матеріали (основні шлаки, золи та ін.);

II група – мінеральні порошки, які хімічно взаємодіють з продуктами гідратації цементу (кислі золи і шлаки, мікрокремнезем, метакаолін та ін.);

III група – дисперсні матеріали, які характеризуються низькою реакційною активністю при питомій поверхні 400...500 м<sup>2</sup>/кг (андезити, сиєніти, діабазити, граніти);



IV група – реакційно неактивні наповнювачі (піролюзит, деякі оксиди металів та ін.).

Ця класифікація також є умовною, як відзначають самі автори [97], і справедливою при дисперсності порід, що не перевищує 600 м<sup>2</sup>/кг. Дана класифікація також як і попередня враховує лише хімічну активність не беручи до уваги такий найважливіший показник активності наповнювача як величину його поверхневої енергії, яка визначає міцність адгезійних контактів у системі цемент-наповнювач. Відповідно до термодинамічної концепції адгезії [80] для створення міцних адгезійних контактів поверхнева енергія наповнювача повинна бути більшою ніж поверхнева енергія цементу.

Вплив наповнювачів у цементних системах проявляється на мікро-, мезо - і макрорівні [76].

На мікрорівні проявляється молекулярна взаємодія продуктів гідратації цементу з наповнювачем. Хімічно активні кремнеземисті наповнювачі в результаті реакції з Ca(OH)<sub>2</sub> – продуктом гідролізу клінкерних мінералів утворюють додаткові кількості низькоосновних гідросилікатів кальцію [81; 82]. Карбонатні наповнювачі утворюють комплексні сполуки з гідроалюмінатами і вступають в обмінні реакції з гідросилікатами кальцію [83; 84]. Сутність фізико-хімічної взаємодії наповнювачів з гідратованим цементом полягає у формуванні епітаксіольних контактів, а також центрів кристалізації. Останні згідно з вченням Гіббса-Фольмера значно зменшують необхідну енергію утворення зародків кристалів гідратних новоутворень у твердіючому цементному тісті [85–88]. Цей ефект зростає в умовах тепловологісної обробки, а також при зменшенні радіуса зерен наповнювачів, введенні добавок прискорювачів тверднення [76].

При оптимальній концентрації і дисперсності наповнювача утворюється дрібнозерниста структура цементного каменю, що позитивно позначається на його властивостях [87].

За певних умов можливий і деструктивний вплив наповнювача [76]. Він може мати місце, якщо параметри наповнення виходять за межі оптимуму і в усьому обсязі цементного каменю або в окремих його ділянках виникають

розтягувальні напруження [76].

На мезорівні частинки наповнювача взаємодіють як з частинками гідратуючого цементу, так і між собою. В результаті збільшення об'ємної концентрації твердої фази частина води замішування переходить в плівковий стан і створюються т.зв. “стиснені умови”, що позитивно позначається на формуванні структури цементного каменю [88–90].

При досить тонкому прошарку дисперсійного середовища частинки наповнювача взаємодіють одна з одною. Сили зчеплення частинок можна знайти [91] за формулою:

$$F_c = \frac{2}{3} \pi B r / H^3. \quad (1.14)$$

де  $r$  – радіус частинок,

$B$  – константа молекулярної взаємодії,

$H$  – відстань між частинками.

Середня відстань між частинками наповнювача визначається відношенням середнього об'єму матриці  $V_m$  до сумарної площі поверхні частинок:

$$H_{cp} = V_m / (V_n S_{n.n}), \quad (1.15)$$

де  $V_n$  – об'єм наповнювача;

$S_{n.n}$  – питома поверхня наповнювача.

Поряд з поверхневими силами в цементно-водній системі, яка містить наповнювачі, при наявності на їх поверхні некомпенсованого електричного заряду діють кулонівські сили. При різній природі в'язучого і наповнювача виникає додаткова сила електростатичного притягіння ( $F_e$ ), значення якої може бути обчислена за формулою:

$$F_e = q^2 / (12 r H), \quad (1.16)$$

де  $q$  – заряд;

$r$  – радіус частинок наповнювача;

$H$  – відстань між ними.

Максимальна міцність контакту між частинками наповнювача в цементній матриці досягається при інтенсивних

методах ущільнення наповнених систем або застосуванні пластифікуючих поверхнево-активних речовин (ПАР).

Сили зчеплення між окремими частинками наповнювача збільшуються в міру зменшення на них товщини прошарку зв'язуючого.

Покращення організації структури наповненого зв'язуючого має місце в результаті утворення асоціатів наповнювачів або т.зв. кластерів [92; 93]. При цьому, однак, можливий прояв внутрішніх неоднорідностей поверхонь розділу в результаті концентрації напружень і при переході через деяку критичну ступінь наповнення істотно знижується міцність цементного каменю [94; 95].

На макрорівні наповнювач суттєво впливає на адгезійну міцність між цементним тістом і заповнювачем, когезійну міцність матричної складової цементних композитів і їх щільність. Зменшуючи міжзернові відстані в бетонах і розчинах наповнювачі можуть істотно збільшувати міцність контактної зони, що позитивно впливає на міцність матеріалів в цілому. В роботі [96] при зменшенні міжзернових відстаней в розчинах на кварцовому піску з 210 до 30 мкм твердість цементного каменю зросла в 1,5...2 рази. Мінімально необхідна товщина прошарку цементного тіста на зернах заповнювача становить приблизно  $13 \cdot 10^{-6}$  м [97]. Досягти такого тонкого прошарку цементного тіста можливо введенням до його складу достатньої кількості наповнювача.

Відповідно до сучасних уявлень ефективність введення наповнювачів істотно збільшується при їх комбінуванні з добавками суперпластифікаторів СП. В результаті вибіркової адсорбції молекул СП на зернах мінерального порошку істотно підвищується їх диспергуюча дія в цементних системах. В технології високоміцних, у тому числі і реакційно-порошкових бетонів, істотно важливим є вибір наповнювачів, які реологічно поєднуються з суперпластифікаторами, що застосовуються.

Дослідженню впливу різних видів дисперсних мінеральних наповнювачів на властивості цементних розчинів і бетонів, присвячено значна кількість робіт. Отримані при цьому результати залежать від виду наповнювачів, їх гідравлічної,

пуцоланової та поверхневої активності, дисперсності і зернового складу, способу введення і вмісту.

Властивості розчинів і бетонів, що містять мінеральні наповнювачі, залежать значною мірою від їх впливу на водопотребу сумішей, що необхідна для досягнення заданих показників легкоукладальності.

Водопотреба наповнювачів залежить від багатьох факторів: водопоглинання, форми і особливостей поверхні зерен, дисперсності [76; 82; 98] та ін. Більшість мінеральних наповнювачів тою чи іншою мірою збільшують водопотребу розчинових або бетонних сумішей. Разом з тим такий наповнювач як зола-виносу завдяки скловидній поверхні частинок, їх сферичній формі, може викликати при оптимальній концентрації пластифікуючий ефект [82; 98]. Цей ефект зменшується або зникає повністю при застосуванні більш грубодисперсних зол, що містять підвищену кількість незгорілих вуглецевих частинок із високим водопоглинанням, а також частинок неправильної форми [97, 99].

В системі цемент-вода наповнювач утримується за допомогою коагуляційних контактів, міцність яких ( $f_k$ ) описується [76] формулою:

$$f_k = \nu f(F_p, \varphi, S_{num}^2), \quad (1.17)$$

де  $\nu$  – постійна хімічної взаємодії,

$F_p$  – результуюча сила взаємодії між частинками,

$\varphi$  – ступінь наповнення,

$S_{num}$  – питома поверхня частинок.

Утворення міцних коагуляційних контактів сприяє зниженню водовідділення наповнених цементно-водних сумішей.

Вплив дисперсних наповнювачів на міцність цементних композитів до певної оптимальної концентрації є зазвичай позитивним [100; 101] за умови запобігання істотного збільшення водопотреби суміші.

Міцність наповнених цементних систем формується в результаті синтезу хімічних, фізико-хімічних і фізико-

механічних процесів у системі цемент-вода-заповнювач. Наповнювач у цих процесах бере активну участь. Величина позитивного ефекту може коливатися в широкому діапазоні залежно від того, якою мірою змінюється склад і структура матеріалу. При цьому важливе значення мають такі чинники як ступінь гідратації і фазовий склад наповненого цементного каменю, адгезійна міцність цементного каменю по відношенню до заповнювачів, особливості кристалічної та порової структури [102; 103].

Збільшення ступеня гідратації та обсягу гідратних новоутворень є одним з основних результатів введення наповнювачів, що мають досить високу пуцоланову активність таких як золи і шлаки [76; 82; 98].

При введенні високодисперсних кремнеземистих наповнювачів з високою поверхневою енергією, таких як мікрокремнезем і метакаолін, істотно змінюються умови утворення конденсаційно-кристалізаційної структури цементного каменю, прискорюється утворення зародків кристалів гідратних новоутворень, структура стає значно щільнішою, різко зростає адгезійна міцність і міцність цементного каменю в контактній зоні з заповнювачами [105–108].

Введення малоактивних наповнювачів може бути ефективним як замість частини цементу, так і піску в результаті зменшення товщини клейового прошарку на зернах заповнювачів і зменшення їх пустотності [96].

Оптимальна кількість дисперсних наповнювачів у цементних системах коливається, як правило, в інтервалі від 10 до 70%. Високоактивні наповнювачі (мікрокремнезем, метакаолін) забезпечують істотне збільшення міцності в межах 10...20%. З позицій економії цементу при збереженні або невеликому зниженні міцності композитів може рекомендуватися від 30 до 70% наповнювачів [79].

Є суперечливі рекомендації щодо оптимальної дисперсності наповнювачів. У роботах [109–111] рекомендується при введенні в цемент інертних або малоактивних наповнювачів більш тонко подрібнювати

клінкерну складову, більш активних наповнювачів – навпаки. У роботах останніх років констатується, що підвищену міцність наповнені дисперсні системи (у присутності суперпластифікаторів) мають при використанні наповнювачів з дисперсністю до 900...1200 м<sup>2</sup>/кг, тобто такої, що в 2...4 рази перевищує дисперсність цементу [76; 112; 113]. Теоретичні обґрунтування [76; 114] показали, що стосовно цементно-водних систем, наповненим меленим кварцовим піском, оптимальне співвідношення між розмірами наповнювача і в'язучого повинно знаходитися в межах 8...10. Разом з тим, якщо поверхнева енергія зерен наповнювача істотно вища, ніж у зерен цементу, бажане співвідношення діаметрів їх часток наближається до 1.

Прогнозуючи вплив наповнювачів на міцність цементних композитів, необхідно враховувати хіміко-мінералогічний склад клінкеру. Стосовно, наприклад, таких активних наповнювачів як зола-виносу встановлено [115], що в ранньому віці зростання міцності сприяє підвищений вміст в клінкері лугів, що прискорюють хімічну взаємодію наповнювача і цементу. При використанні всіх видів наповнювачів, які володіють пуцолановою активністю, надають перевагу цементам із підвищеним вмістом аліту, що утворюється при гідролізі Са(ОН)<sub>2</sub>. Карбонатні наповнювачі хімічно активні також по відношенню до гідроалюмінатів і гідросульфалюмінатів, що утворюються при гідратації цементу.

Поряд із впливом активних наповнювачів на міцність при стиску бетонів і розчинів відзначається [115] їх позитивний вплив на відношення міцності на розтяг до міцності на стиск і, відповідно, на тріщиностійкість цементних композитів. Відомо [82], що більш високе співвідношення міцності бетону на розтяг до міцності на стиск має місце при введенні в цемент золи, шлаку, а також використанні карбонатних заповнювачів.

Залежно від виду мінерального наповнювача, його хімічної та фізико-хімічної активності може змінюватися весь комплекс будівельно-технічних властивостей цементних композитів. При можливому збільшенні ступеня гідратації цементу активними наповнювачами та щільності бетонних

сумішей можна очікувати зменшення повзучості бетону [116; 117]. Це підтверджено дослідними даними [82; 118].

Вплив наповнювачів на усадочні деформації є неоднозначним. Усадка цементного каменю, як відомо, визначається кількістю адсорбційно-зв'язаної води, що випаровується і залежить від відносного вмісту гідросилікатів кальцію та їх питомої поверхні. Тому при введенні тонкодисперсних високоактивних наповнювачів можна очікувати деякого збільшення усадочних деформацій. Разом з тим, при зниженій водопотреби відзначається [76; 82] можливе зниження усадочних деформацій наповнених цементних композитів. Це особливо характерно при використанні наповнювачів із низькою хімічною активністю, які так само як і заповнювачі зменшують відносний вміст в тверднучій системі гідросилікатів кальцію [79].

Крім міцнісних та деформаційних властивостей, введенням в цементні системи певних мінеральних наповнювачів можна управляти при необхідності їх корозійною стійкістю, екзотермією, жаростійкістю, водонепроникністю та ін. [76; 82; 115; 119–122].

Разом з тим, поряд з позитивним ефектом введення мінеральних наповнювачів може викликати певні негативні наслідки. Наприклад, наповнювачі, що містять розчинні луги, можуть викликати підвищення реакційної здатності в'язучого в бетонах і розчинах [99]. У цьому випадку при використанні реакційноздатних заповнювачів вміст лужних оксидів у наповненому в'язучому не повинен перевищувати 0,6% за масою і бажано використання практично безлужних цементів. У той же час деякі дослідження [76] показали, що заміщення цементу таким наповнювачем як кам'яновугільна зола зменшує взаємодію між лугами та заповнювачами і допустима межа можливого вмісту лужних оксидів у цементно-зольному в'язучому може бути піднята до 1,5%.

Спеціальні експериментальні обґрунтування необхідні при введенні мінеральних наповнювачів у цементні композити підвищеної морозостійкості, стійкості до стирання, тверднучих в умовах низьких температур та ін. [73; 123].

Активність мінеральних наповнювачів, як уже зазначалося, формується за рахунок їх здатності до хімічного та

фізико-хімічного впливу на процеси формування штучного каменю. Підвищення активності наповнювачів (активація) можливе за рахунок комплексу технологічних прийомів, спрямованих на посилення їх позитивного ефекту в цементних системах.

Класифікація способів активації наповнювачів із зазначенням їх можливої кількості у відсотках від маси цементу і очікуваного зростання міцності наведена в роботі [124]. (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Способи активації кремнеземистих наповнювачів та їх вплив на механічні властивості бетонів

Способи активації	Ріст міцності бетонів, %
- домел зі створенням захисних плівок	125...140
- введення активних присадок для підвищення поверхневої енергії	130...155
- термообробка до склування	150
- гідротермальна обробка	145...165
- гідромеханічна обробка з вапновмісними компонентами	150...170
- обробка розчинами сильних кислот	150...165
- обробка гідрофілізуючими ПАР	115...120
- акустична обробка	140...180
- електродинамічна обробка	150...170

Підвищення питомої поверхні наповнювача шляхом додаткового подрібнення (механічний спосіб) і модифікування його поверхні добавками ПАР (хімічний спосіб) можна вважати основними дослідженими способами їх активації. Ефективною є комбінація обох способів (механо-хімічний спосіб) [76].

При домелі наповнювачів збільшується їх хімічний потенціал  $\mu$  відповідно до формули [77]:

$$\Delta\mu = 2\sigma V_m / r, \quad (1.18)$$

де  $\sigma$  – величина поверхневої енергії;

$V_m$  – кількість (в молях) речовини, що утворює сферичну частинку;

$r$  – радіус частинок.



Для визначення поверхневої енергії портландцементу і деяких видів наповнювача В. І. Соломатовим вивчені їх електронні спектри з низкою індикаторів, що дозволило знайти концентрацію кислотних і основних центрів на поверхні цих порошків [125; 126]. В якості критерію поверхневої активності прийнято відношення сумарної концентрації кислотних і основних центрів. Воно виявилось для портландцементу 8,8, для глієжу – 8,4, шлаку – 16,4, золи-виносу – 15,4. Такий спосіб визначення поверхневої активності порошків є проте, досить складним і для практики більш прийнятні непрямі способи визначення поверхневої активності за величиною аутогезії, тобто силі зчеплення частинок і теплоті змочування різними рідинами [127; 128].

Можливість активації мінеральних наповнювачів добавками ПАР впливає з рівняння Дюпре-Юнга [76], що зв'язує роботу адгезії  $W_{ад}$  з поверхневою енергією  $W_t$ :

$$W_{ад} = W_m - W_m(m + \cos \theta), \quad (1.19)$$

де  $W_m$  – вільна поверхнева енергія твердого тіла в атмосфері парів і газів;

$m = \sigma'_{жс} / \sigma_{жс} > 1$  ( $\sigma'_{жс}$  – поверхневий натяг рідини, орієнтованої під впливом силового поля твердої поверхні;

$\sigma_{жс}$  – поверхневий натяг рідини, що змочується);

$\theta$  – крайовий кут змочування.

При обробці наповнювача добавками ПАР в результаті створення адсорбційного середовища має місце зменшення міжфазної поверхневої енергії  $\Delta\sigma_{т.жс}$  і, як наслідок, збільшення роботи адгезії:

$$\Delta\sigma_{т.жс} = KT \int_0^c n_s(C) d \ln C, \quad (1.20)$$

де  $K$  – постійна Больцмана;

$T$  – абсолютна температура, °C;

$n_s$  – величина адсорбції, обумовлена  $n_s-1$  числом молекул ПАР, адсорбованих на 1 см<sup>2</sup> поверхні розділу фаз (S);

$C$  – концентрація ПАР.

Вплив адсорбційного середовища, створюваного ПАР, зростає в міру підвищення дисперсності наповнювача і,

відповідно, надлишкової поверхневої енергії.

Активация адгезійної здатності мінеральних порошоків може досягатися в результаті збільшення їх вільної поверхневої енергії при дії електричного і магнітних полів, ультразвукової обробки, за допомогою іонізуючих випромінювань [76; 71].

Для практичної технології розчинів і бетонів цікаві способи активації, що легко реалізуються і потребують мінімальних витрат енергетичних ресурсів. У цьому плані перспективними є композиційні наповнювачі, що складаються з двох або декількох компонентів, які підсилюють їх інтегральний ефект в цементних системах. Ефективність комбінованих золотмісних наповнювачів показана в роботах Л. І. Дворкіна і О. Л. Дворкіна [76; 87]. Вибір раціонального поєднання компонентів комбінованих наповнювачів є технологічним і техніко-економічним завданням, яке, очевидно, в кожному випадку вимагає спеціальних досліджень.

### 1.5.3. Введення суперпластифікаторів і зниження В/Ц

Численними дослідженнями і технологічною практикою доведено, що основним напрямком підвищення міцності бетонів є зниження В/Ц.

Радикальним способом зменшення В/Ц без істотного погіршення легкоукладальності бетонної суміші є введення добавок суперпластифікаторів (СП). На відміну від звичайних пластифікаторів, що знижують витрату води до 10...15%, СП дозволяють скорочувати витрати води на 20...30% (табл. 1.2) і більш і відповідно збільшувати міцність бетонів.

Таблиця 1.2

Класифікація пластифікаторів бетонних сумішей

Категорія	Найменування	Збільшення ОК із 2...4 см	Зменшення кількості води, %
I	Суперпластифікатори	До 20 і більше см	не менше 20
II	Пластифікатори	14...19 см	не менше 10
III	Пластифікатори	9...13 см	не менше 5
IV	Пластифікатори	8 см і менше	менше 5

Суперпластифікатори (СП) почали застосовувати у виробництві бетону на початку 1970-х років. Завдяки їм виявилось можливим істотно покращити властивості бетону без збільшення витрати цементу, одержувати бетони з литих сумішей з ОК > 20 см (литі бетони) при помірному водовмісті, високоміцні бетони на звичайних портландцементях і заповнювачах з низькою проникністю, високою корозійною стійкістю і т.д.

Введення СП є в даний час обов'язковою умовою виробництва високоякісних, високотехнологічних бетонів НРС.

Прийнята в даний час класифікація суперпластифікаторів (табл. 1.3) розділяє їх за складом і механізмом дії.

Механізм дії СП обумовлений комплексом фізико-хімічних процесів у системі цементне тісто-добавка. Механізм дії СП визначається головним чином:

1. Адсорбцією моно- або полімолекулярних ПАР на поверхні в основному гідратних новоутворень;

2. Колоїдно-хімічними явищами на межі поділу фаз.

Широко поширений СП «Розріджувач С-3» належить до групи СП нафталінформальдегідного типу (НФ). Його виготовляють як у виді 20...40%-них розчинів, так і порошок. При дозуванні добавки 0,5...1% маси цементу він дозволяє збільшити рухомість бетонної суміші від 2...4 см до 20...22 см. В умовах рівної рухомості сумішей бетони із СП С-3 в результаті зменшення  $B/C$  мають міцність у віці 28 діб на 30...50% вище, ніж бетони без добавки. При цьому істотно зростають щільність і водонепроникність, покращується ряд інших властивостей бетону.

Таблиця 1.3

Класифікація суперпластифікаторів

Позначення	Склад СП	Механізм дії	Відносна вартість полімеру, %
НФ	На основі сульфованих нафталінформальдегідних поліконденсатів	Електростатичний	40

продовження табл. 1.3

МФ	На основі сульфованих мелаїноформальдегідних поліконденсатів	Електростатичний	80
ЛСТ	На основі очищених від цукрів лігносульфонатів	Електростатичний	20
П	На основі полікарбоксилатів і поліакрилатів	Стеричний	100

Добавки СП нового покоління типу П на основі полікарбоксилатів забезпечують збільшення осадки конуса бетонної суміші від 3 см до 21...24 см при дозуванні всього 0,17...0,22% від маси цементу. Якщо бетонні суміші з добавками традиційних СП швидко втрачають рухливість, то суміші з добавками полікарбоксилатів знаходяться в пластичному стані 1,5...2 год. Висока здатність до зберігання бетонних сумішей із СП типу П робить їх особливо привабливими для монолітного будівництва і при тривалому транспортуванні. Як і інші СП, вони з успіхом застосовуються і при тепловологісній обробці бетону в індустрії збірного залізобетону.

Поряд із ефективними пластифікаторами нового покоління представляють інтерес і комплексні добавки, які поряд із суперпластифікаторами містять відомі і значно більш дешеві добавки з меншим пластифікуючим ефектом (наприклад технічні лігносульфонати (ЛСТ)).

#### 1.5.4. Зерновий склад і співвідношення заповнювачів

Для високоміцних, в т.ч. і реакційно-порошкових бетонів, до найбільш важливих технологічних задач відноситься оптимізація зернового складу заповнювачів. Перші роботи з проектування зернового складу заповнювачів бетонів були спрямовані на забезпечення мінімальної пустотності сумішей зерен різної форми і крупності [67].

При відомих значеннях насипної густини заповнювача ( $\rho_n$ ) і густини його зерен ( $\rho_z$ ) розрахункове значення пустотності ( $\Pi^0$ ):

$$P^0 = \left( 1 - \frac{\rho_n}{\rho_s} \right). \quad (1.21)$$

При змішуванні заповнювачів розрахункове значення пустотності можна визначити за формулою:

$$P^0 = 1 - \frac{\rho_n^{cm}}{m^{cm}} [V_1(1 - P_1^0) + V_2(1 - P_2^0) + \dots + V_n(1 - P_n^0)], \quad (1.22)$$

де  $m^{cm}$  і  $\rho_n^{cm}$  – маса суміші заповнювачів та її насипна густина;

$V_1, V_2, \dots, V_n$  – насипні об'єми фракцій, що змішуються;

$P_1^0, P_2^0, \dots, P_n^0$ , – пустотність фракцій заповнювачів, що змішуються.

У 1914 р. Б. Ніколаєв проаналізував геометричну структуру простору, заповненого зернами сипучого матеріалу. Ним розрахована пустотність зерен різної геометричної форми при найбільш і найменш щільній укладці (табл. 1.4).

На практиці найбільш і найменш щільні укладки зерен малоймовірні. Значення пустотності зростають із збільшенням лещадності зерен, особливо при застосуванні зерен подовженої форми.

Сформувалися два підходи для забезпечення щільних сумішей зерен заповнювачів: вибір переривчастого або безперервного їх складу.

Таблиця 1.4

Пустотність сипучих матеріалів залежно від форми зерен

Форма зерна	Пустотність, %		
	при найбільш щільній укладці	при найменш щільній укладці	середні значення
Куби	0	87,1	43,55
Октаедри	12,1	83,9	48,05
Додекаедри	14,1	60,7	37,4
Ікосаедри	10,3	59,9	35,1
Кулі	26,2	47,6	36,9

Приблизники переривчастої гранулометрії суміші заповнювачів виходять із геометричних закономірностей укладки зернистих матеріалів. Так, відомо, що при кубичній

укладці дрібних і крупних куль із діаметром відповідно  $d$  і  $D$  для забезпечення найбільш щільної їх укладки, має виконуватися умова:

$$d = D\sqrt{2} - D = 0,41D. \quad (1.23)$$

При тетраедричній укладці

$$d = \frac{2}{3}D\sqrt{3} - D = 0,155D. \quad (1.24)$$

Кубічна упаковка куль має пустотність 47,6, тетраедрична – 26%.

Оптимальні співвідношення діаметрів найменших фракцій зерен до діаметра найбільшої фракції коливаються від 0,07 до 0,04.

А. І. Кудяковим запропонована формула, за якою можна визначити необхідну кількість  $n$ -ної фракції багатofракційного заповнювача:

$$Q_n = \rho(1 - \varphi'_1)(1 - \varphi'_2) \dots (1 - \varphi'_{n-1})\varphi''_n, \quad (1.25)$$

де  $\rho$  – густина матеріалу;

$\varphi'_1, \varphi'_2, \varphi'_n$  – коефіцієнти заповнення, які показують зміну об'єму пустот крупної фракції при послідовному заповненні їх більш дрібними зернами. На практиці значення  $\varphi'_2 \dots \varphi'_n$  можна приймати рівними 0,2.

Тоді:

$$Q_n = \rho(1 - \varphi'_1)(0,8^{n-2})\varphi''_n, \quad (1.26)$$

де  $n$  – число фракцій;

$\varphi''_n$  – коефіцієнт заповнення, який показує необхідну кількість останньої фракції. Для граніту, базальту, вапняку  $\varphi''_n = 0,307 \dots 0,351$ .

Хоча переривчастий зерновий склад і забезпечує меншу пустотність суміші зерен, більшість дослідників віддає перевагу безперервному зерновому складу заповнювачів бетонних сумішей. Це пояснюється необхідністю при однаковій рухомості бетонних сумішей в останньому випадку меншого об'єму дрібних фракцій і відповідно витрати цементу на обмазку зерен. Крім того, суміші з безперервним зерновим складом менше

схильні до розшарування.

Для вибору безперервного зернового складу заповнювачів запропоновані різні «ідеальні» криві просіювання, з яких найбільшу популярність одержали криві Фулера, Боломей і Гуммеля, які виражаються досить близькими формулами [67]:

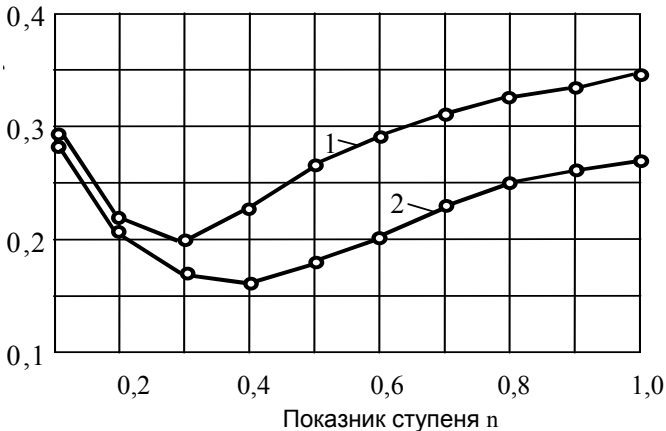
Формула	Автор
---------	-------

$Y = 100 \sqrt{\frac{d}{D}}$	(1.27)	Фулер
------------------------------	--------	-------

$Y = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}}$	(1.28)	Боломей
--	--------	---------

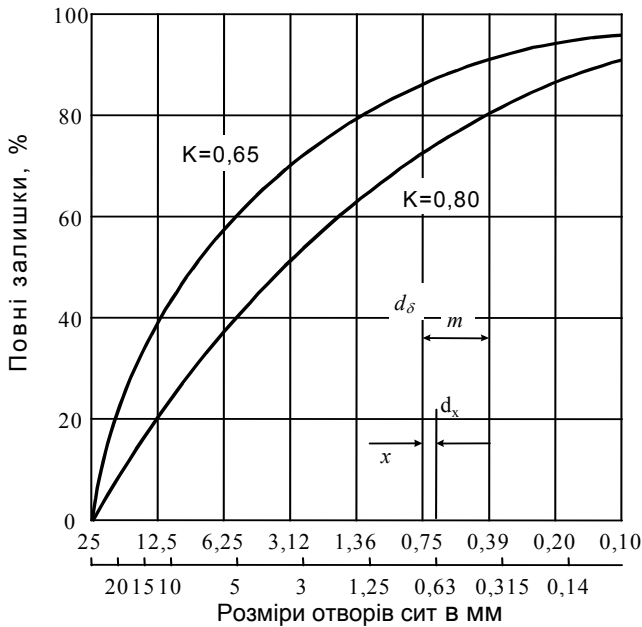
$Y = 100 \left( \frac{d}{D} \right)^n$	(1.29)	Гуммель
--	--------	---------

У формулах (2.27...2.29)  $d$  – розмір зерен даної фракції;  $D$  – гранична крупність заповнювача;  $A$  – коефіцієнт, рівний 8 для гравію і піску для жорстких і 10 для пластичних бетонних сумішей. При використанні щебеню і піску –  $A=10$  для жорстких і 12 для пластичних бетонних сумішей;  $n$  – показник степеня, рівний у сумішах на щебені 0,2...0,4, на гравії 0,3...0,5 (за Гуммелем) показник степеня  $n$  може коливатися від 0,1 до 1 (рис. 1.8).



**Рис. 1.8.** Зміна пустотності крупних заповнювачів залежно від показника  $n$  (за даними Гуммеля): 1 – оптимальна крива просіювання сумішей заповнювачів на щебені; 2 – те ж на гравію

Методика побудови кривих щільних сумішей, яка використовується при доборі складу заповнювачів асфальтових бетонів, запропонована М. М. Івановим. Ним прийняте співвідношення об'ємів кожної наступної фракції до попередньої, максимальна крупність якої більша в 2 рази (т.зв. коефіцієнт збігу), рівним  $k=0,81$ . При розрахунку за формулою Фуллера таке відношення (за умови рівності густин кожної фракції) дорівнює  $k=0,707$ , за формулою Гуммеля при  $n=0,3$   $k=0,812$ . Досить щільні суміші за М. М. Івановим можна одержати при значенні коефіцієнта збігу в межах  $0,65 \dots 0,8$  (рис. 1.9).



**Рис. 1.9.** Криві щільних мінеральних сумішей при різних значеннях коефіцієнта збігу ( $k$ )

Якщо прийняти вміст у % першої фракції рівним  $a$ , то вміст другої буде  $a_1k$ , третьої  $a_2k$  і т.д. Кількість останньої фракції повинна дорівнювати  $a_{n-1}k$ .

Сума об'ємів усіх фракцій може бути записана в



наступному вигляді:

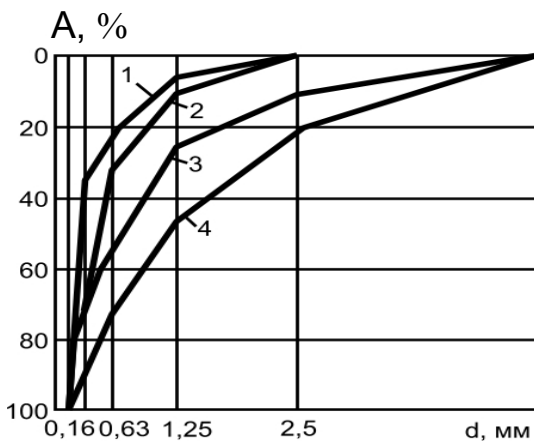
$$a(1 + \kappa + \kappa^2 + \dots + \kappa^{n-1}) = 100\% . \quad (1.30)$$

Отже, вміст першої фракції (тобто частковий залишок на відповідному ситі):

$$a_1 = \frac{1 - \kappa}{1 - \kappa^n} \cdot 100 . \quad (1.31)$$

Для цементних бетонів використання кривих щільних сумішей заповнювачів раціональне лише в деяких випадках, наприклад, для пресованих або вібропресованих бетонів, які виготовляються із сипучих сумішей.

Для реальних заповнювачів зерновий склад завжди відхиляється від ідеальної кривої, тому в стандартах, що визначають вимоги до крупного і дрібного заповнювачів, вказують рекомендовану область зернових складів (рис. 1.10), вихід за межі яких приводить до істотної перевитрати цементу. Пустотність заповнювачів коливається від 20 до 50% і регулюється їхнім фракціонуванням із наступним змішуванням.



**Рис. 1.10.** Зерновий склад піску для бетонів:

1, 2 – нижня границя крупності, що допускається ( $M_{кр}=1,5$ ) і рекомендується ( $M_{кр}=2$ ); 3, 4 – верхня границя крупності, що рекомендується ( $M_{кр}=2,5$ ) і допускається ( $M_{кр}=2,25$ );

A – повний залишок на ситах розміром d

Інтегральною характеристикою крупності, що широко застосовують для оцінки якості піску як заповнювача бетонів, є модуль крупності

$$M_{кр} = \frac{A}{100}, \quad (1.32)$$

де  $A$  – сума повних залишків на контрольних ситах, %:

$$A = A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,16} \quad (1.33)$$

Повні залишки на кожному із сит знаходять, сумуючи часткові залишки на даному ситі і ситах із більш крупними отворами.

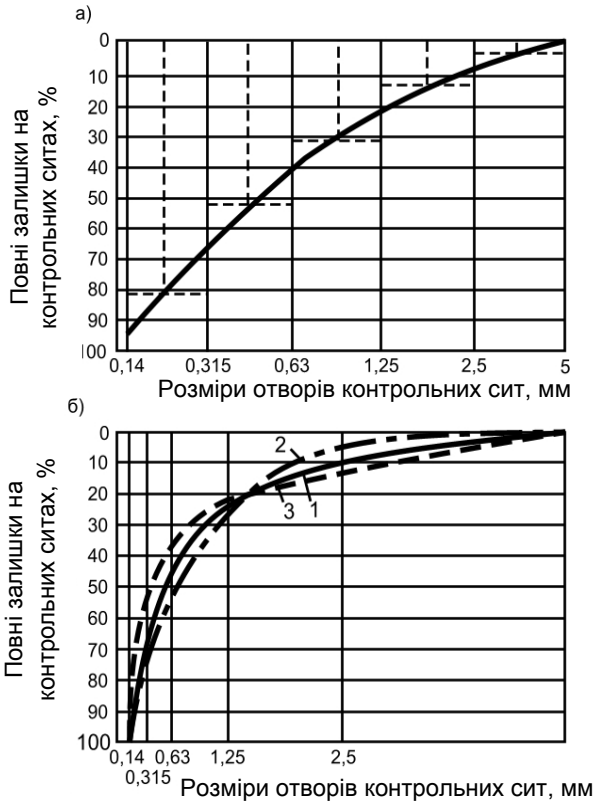
Модуль крупності піску характеризує площу над інтегральною кривою просіювання (рис. 1.11). Недоліком цього показника є те, що він неоднозначно характеризує зерновий склад: одному і тому ж значенню  $M_{кр}$  можуть відповідати різні криві просіювання. Для обмеження області можливого варіювання кривих просіювання при оцінці якості піску разом з модулем крупності вказують додатково повний залишок на ситі № 063 (табл. 1.5).

Для пластичних бетонних сумішей істотний вплив на оптимальне співвідношення фракцій заповнювача чинять товщина і консистенція прошарку цементного тіста, які змінюються залежно від заданих значень властивостей бетонної суміші і бетону. З позицій мінімізації витрати цементу важливо, щоб при цьому склад заповнювача забезпечував мінімально можливу пустотність при найменшій сумарній поверхні.

Таблица 1.5

Групи пісків за крупністю

Група пісків	Модуль крупності, $M_{кр}$	Повний залишок на ситі № 063, % за масою
Крупний	більше 2,5	більше 45
Середньої крупності	2,0...2,5	30...45
Дрібний	1,5...2,0	10...30
Дуже дрібний	1,0...1,5	до 10



**Рис. 1.11.** Інтегральні криві просіювання піску:

а – в напівлогарифмічній системі координат; б – варіанти кривих просіювання (1–3) пісків з однаковим модулем крупності

Необхідний об'єм цементного тіста при одержанні щільного бетону:

$$V_{ц.т.} = \Pi_a^0 V_3 + \delta U_3 V_3 + V_{н.в.}, \quad (1.34)$$

де  $\Pi_a^0$  і  $U_3$  – пустотність (за абсолютним об'ємом) і питома поверхня заповнювача;

$V_3$  – абсолютний об'єм заповнювача;

$V_{н.в.}$  – об'єм повітря;

$\delta$  – товщина шару цементного тіста.

Питому поверхню заповнювача ( $U$ ) можна визначити через середній розмір зерна  $d_{cp}$ :

$$U = \frac{N}{d_{cp}}, \quad (1.35)$$

де  $N$  – коефіцієнт, що залежить від форми зерна і рельєфу його поверхні.

В ідеальному випадку для полірованої кулі  $N=6$ , для реальних сипучих матеріалів цей коефіцієнт значно вище.

Для визначення розрахункової питомої поверхні заповнювачів можна використовувати різні емпіричні формули. Для кварцового піску питому поверхню можна розрахувати по формулі:

$$U_n = \frac{0.025}{\rho_n} (a_1 + 2a_2 + 4a_3 + 7,4a_4 + 15a_5 + 110a_6), \quad (1.36)$$

де  $a_1...a_6$  – відсотковий вміст фракцій піску при стандартному розсіві;  $a_1...a_4$  – відсотковий вміст фракцій щебеню (гравію) 60...40, 40...20, 20...10 і 10...5 мм.

Коригування параметрів заповнювачів шляхом змішування, наприклад, двох пісків може виконуватися за допомогою формули:

$$n = \frac{P_1^{\kappa} - P^{\kappa}}{P_1^{\kappa} - P_2^{\kappa}}, \quad (1.37)$$

де  $P^{\kappa}$  – необхідне значення, параметра, який коригується (модуля крупності, питомої поверхні, вмісту зерен певної фракції);

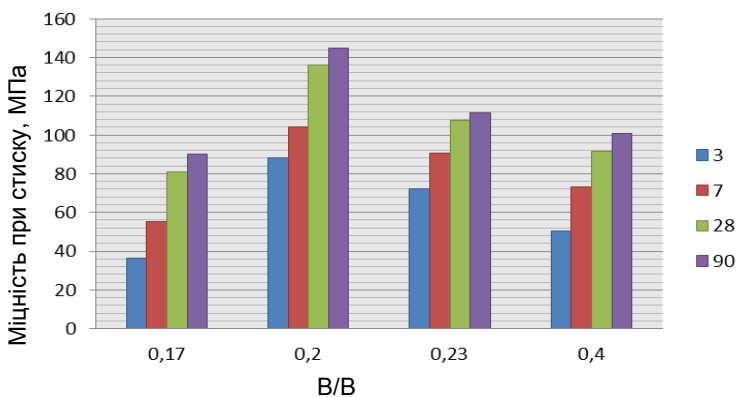
$P_1^{\kappa}$  і  $P_2^{\kappa}$  – значення параметра, який коригується в заповнювачі, відповідно з більшим і меншим його значенням;

$n$  – об'ємна частка заповнювача з меншим значенням  $P^{\kappa}$  в сумі об'ємів заповнювачів, які змішуються.

## 1.6. Експериментальне обґрунтування складів реакційно-порошкових бетонів

### 1.6.1. Вплив водо-в'язучого відношення різних видів суперпластифікаторів та мінеральних добавок

**Вплив водо-в'язучого відношення.** Вплив водо-в'язучого відношення (В/В'яз) на міцність РПБ при стиску вивчався на класичному складі бетону даного виду, що містив цемент ( $840 \text{ кг/м}^3$ ), мікрокремнезем SikaFume-HR/TU ( $360 \text{ кг/м}^3$ ), пісок фракції 0,16...1,25 мм ( $1200 \text{ кг/м}^3$ ) та суперпластифікатор Melflux 2141 f (2% від маси цементу). Вплив В/В'яз на міцність РПБ вказаного складу при стиску при різному терміні твердіння показано у табл. 1.6 та рис. 1.12. З рис. 1.12 чітко видно, що оптимальне відношення В/В'яз, яке дає найвищу міцність на стиск РПБ (досягає  $145,0 \text{ МПа}$  на 90 діб), рівне 0,2. Більш низьке В/В'яз ніж 0,2 викликає зниження міцності РПБ на стиск.



**Рис. 1.12.** Вплив водов'язучого відношення на міцність РПБ у різному віці

Таблиця 1.6

Вплив водо-в'язучого відношення на міцність РПБ  
при різних рухомості бетонної суміші

Міцність РПБ при стиску у віці, МПа	Водо-в'язуче відношення (В/В'яз)			
	0,17	0,2	0,24	0,38
	Рухомість (по Суттарду), мм			
	10	25	30	35
3	36,4	88,1	72,1	50,4
7	55,3	104,2	90,7	73,3
28	81,1	136,2	107,6	91,8
90	90,1	145,0	111,5	100,8

Зниження міцності від максимальної у даному випадку становить від 35% до 60% у віці 3 і 90 діб, відповідно. Зменшення відбувається в основному через відсутність достатньої кількості води замішування у РПБ для забезпечення достатнього ущільнення і належної гідратації.

У роботах [43] відмічено, що низький вміст води також може сприяти утворенню низької кількості портландиту, який необхідний для пуцоланової реакції і утворення нових гідросилікатів кальцію, що сприяє зміцненню міцності. З отриманих результатів видно, що міцність на стиск зменшується і зі збільшенням В/В'яз. Хоча у даному випадку поліпшується легкоукладальність, однак згідно правила В/В'яз при зменшенні В/Ц до певного критичного значення підвищується пористість цементного каменю [31; 32].

Отримані результати (рис. 1.12) також показують, що міцність при стиску збільшується як у ранньому так і більш пізньому віці твердіння. Помітно, що РПБ демонструє більш інтенсивну кінетику наростання міцності порівняно зі звичайним бетоном. Швидкість наростання міцності для звичайного бетону у віці більше 28 діб різко уповільнюється, тоді як для РПБ спостерігається стійкий приріст і до 90 діб. Він відбувається в основному за рахунок пуцоланової реакції у пізньому віці, викликаній впливом мікрокремнезему.

**Вплив вмісту та виду суперпластифікаторів.**  
Визначення оптимальної кількості суперпластифікаторів має

важливе значення для досягнення максимальної міцності РПБ. У деяких роботах відмічається [57], що виробництво зв'язної та текучої суміші для РПБ вимагало надзвичайно великих витрат суперпластифікатора порівняно з бетоном НРС та самоущільнюваним бетоном.

Було проведено дослідження ефективності різних видів суперпластифікуючих добавок на міцність РПБ. В якості добавок було використано: суперпластифікатор поліакрилатного типу Mapei Dynamon SP-3, та полікарбоксилатного типу Melflux 2651F, PCE-7, Muraplast FK 6330. Всі види пластифікуючих добавок використовувалися у вигляді водних розчинів з концентрацією 25...30%. Витрати води визначалися із умови забезпеченості заданого розпливу 25...30 см по віскозиметру Суттарда. Результати випробувань наведені у табл. 1.7, рис. 1.13...1.15.

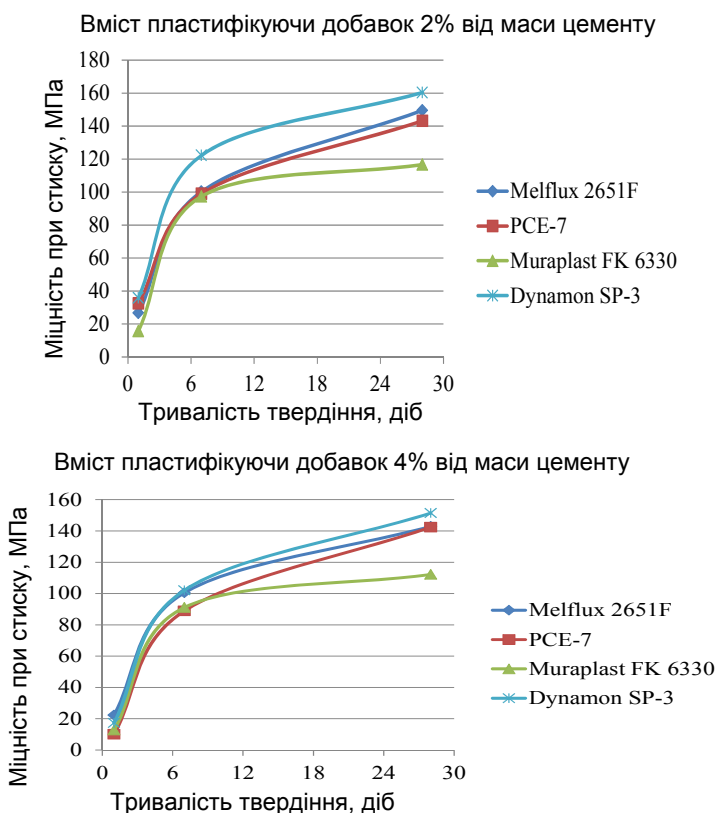
Таблиця 1.7

Вплив виду та кількості добавок-суперпластифікаторів на міцність РПБ

№	Вид пластифікуючої добавки	Витрата пластифікуючої добавки, % від маси цементу	В/Ц	Розплив, см	$f_{cm}^1$ , МПа	$f_{cm}^7$ , МПа	$f_{cm}^{28}$ , МПа
1	Melflux 2651F	2	0,20	30	26,7	100,3	149,6
2		4	0,19	26	22,3	100,5	142,9
3	PCE-7	2	0,20	30	32,5	99,0	143,2
4		4	0,19	30	10,1	88,9	142,4
5	Muraplast FK 6330	2	0,24	30	15,7	97,4	116,7
6		4	0,21	28	12,7	91,1	112,2
7	Dynamon SP-3	2	0,20	30	35,9	122,3	160,4
8		4	0,18	30	17,3	102,1	151,4

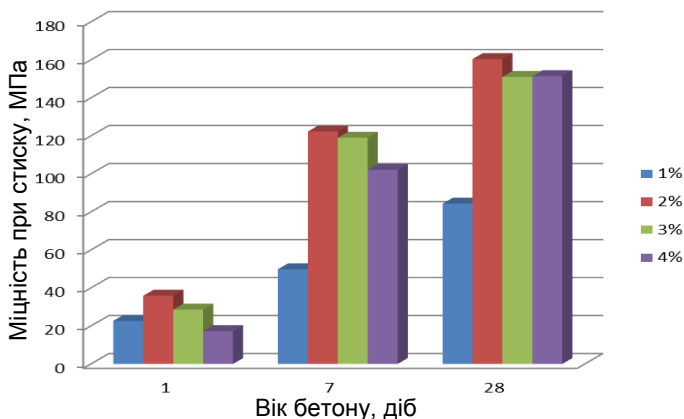
Задана рухомість суміші РПБ була забезпечена при В/В'яз в межах від 0,18 до 0,24. Найбільше значення у виборі оптимального виду добавки для даного виду бетону має міцність на 1-шу та 28-му добу. Максимальну міцність на 28 добу (141 МПа) було досягнуто при використанні добавки Dynamon SP-3 у кількості 2%, при цьому була забезпечена

максимальна текучість і зв'язність суміші при  $B/B'_{\text{яж}} = 0,2$ . Деякі добавки, такі як Muraplast FK 6330 та Melflux 2651F при достатній міцності у 28 діб дещо знижували міцність у ранні терміни. При максимальному дозуванні добавок практично усі досліджені їх види суттєво знижували у першу чергу міцність на 1 добу, а деякі, такі як Muraplast FK 6330 і 28-му. Таким чином, найбільш ефективним видом добавки для РПБ із досліджених можна вважати суперпластифікатор поліакрилатного типу Марей Дунатон SP-3. Даний суперпластифікатор був вибраний для подальших більш детальних досліджень.



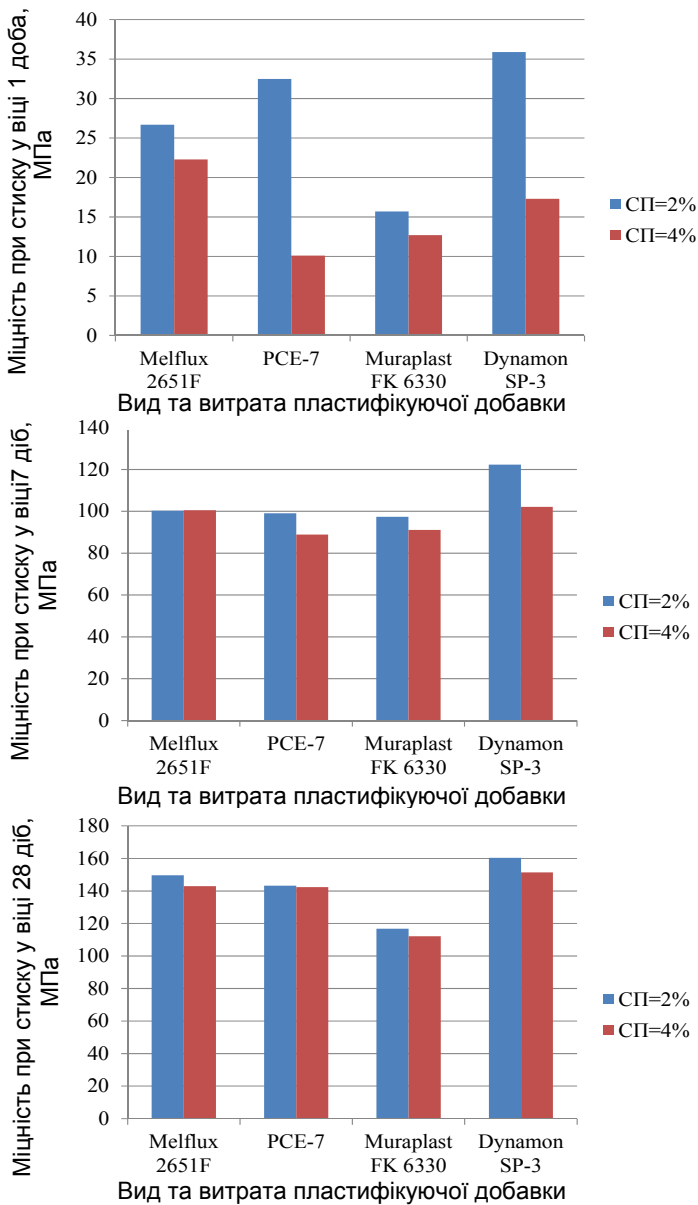
**Рис. 1.13.** Кінетика набору міцності РПБ з різними видами суперпластифікаторів





**Рис. 1.14.** Вплив кількості суперпластифікатора Dynapon SP-3 на міцність РПБ у різному віці

На рис. 1.15 показано вплив дозування суперпластифікатора Dynapon SP-3 на міцність при стиску при постійному В/В'яж ( $V/V'_{\text{яж}}=0,2$ ) у різні терміни твердіння. Рис. 1.14 чітко відображає оптимальне дозування суперпластифікатора, що забезпечує найвищу міцність РПБ при стиску, яке становить 2,0% від маси цементу. Нижчий ніж 2,0% вміст суперпластифікатора викликає суттєве зниження міцності РПБ на стиск. При більшому вмісті СП ніж 2,0%, міцність на стиск РПБ змінюється, але, як правило, у меншій мірі. Порівнюючи значення міцності бетону з кількістю суперпластифікатора 1% можна зробити висновок, що зниження міцності становить від 46% до 66% у діапазоні від 3 до 90 діб. Недостатній вміст СП знижує також легкоукладальність за рахунок тертя при збільшенні поверхні бетонної суміші. Суміш стає менш рухомою і дрібні частинки можуть легко флокуватися по усьому об'єму цементному тісті, у якому залишаються пори



**Рис. 1.15.** Вплив суперпластифікаторів на міцність РПБ у різному віці твердіння

**Ефективність різних видів мінеральних добавок у складі РПБ.** Як показують дослідження різних авторів [4-6], характерних для РПБ унікальних властивостей такий бетон набуває за хунок використання підвищеної кількості високоактивних мінеральних добавок, таких як мікрокремнезем, які хімічно реагують з гідроксидом кальцію і активно зв'язують його у нерозчинні сполуки [50]. Переважна кількість досліджень РПБ [4-8] передбачають обов'язкову необхідність використання у якості активного компонента добавки мікрокремнезему.

Використання мікрокремнезему суттєво ускладнює технологію отримання РПБ та підвищує його вартість, причому у багатьох регіонах (наприклад в Україні) такі добавки відсутні, тому поряд з мікрокремнеземом доцільно розглянути можливість використання активних алюмосилікатних добавок, таких як метакаоліни та цеоліти, а також гідравлічних добавок меншої активності, таких як, золиносу та доменні шлаки.

Метою роботи на даному етапі досліджень було встановлення можливості часткової чи повної заміни мікрокремнезему, як найбільш важкодоступного компоненту порошкових бетонів, більш поширеними мінеральними добавками.

В якості мінеральних добавок при проведенні експериментальних досліджень було використано мелений кварцовий пісок (МКП) з питомою поверхнею  $S_{\text{п}}=3786 \text{ см}^2/\text{г}$ , гранітний аспіраційний пил (АГП) ( $S_{\text{п}}=2367 \text{ см}^2/\text{г}$ ), доменний гранульований шлак (ДГШ) ( $S_{\text{п}}=2725 \text{ см}^2/\text{г}$ ), зола виносу Бурштинської ТЕС (ЗВ) ( $S_{\text{п}}=2527 \text{ см}^2/\text{г}$ ), тонкомелений мелений кремнезем ( $S_{\text{п}}=21094 \text{ см}^2/\text{г}$ ). Для порівняння був також отриманий реакційно-порошковий бетон на мікрокремнеземі SikaFume-HR/TU (МК Sika) ( $S_{\text{п}}=23158 \text{ см}^2/\text{г}$ ) і метакаоліні з  $S_{\text{п}}=10125 \text{ см}^2/\text{г}$ . Також порівняння усіх досліджених складів здійснювалось з порошковим бетоном, що не містить жодних мінеральних наповнювачів ні інертних, ні активних.

Під час експерименту визначалась водопотреба бетонної суміші (В/Ц) до досягнення необхідної рухомості текучої суміші. Рухомість контролювалась шляхом вимірювання розпливу за віскозиметром Суттарда (25...30 см). З бетонної суміші виготовлялись зразки-куби  $10 \times 10 \times 10 \text{ см}$  та балки  $4 \times 4 \times 16 \text{ см}$ . Склади бетону наведені у табл. 1.7. В усіх точках експерименту було використано

поліакрилатний суперпластифікатор Mapei Dynamon SR3. Визначали міцність при стиску та при згині у віці 1, 7, 28 діб твердіння у нормальних умовах. Також для вибору ефективних складів реакційно-порошкових бетонів було розраховано показники  $C_f = C/f_{cm}$ . Результати експерименту наведені у табл. 1.8 та на рис. 1.16...1.18.

Таблиця 1.8

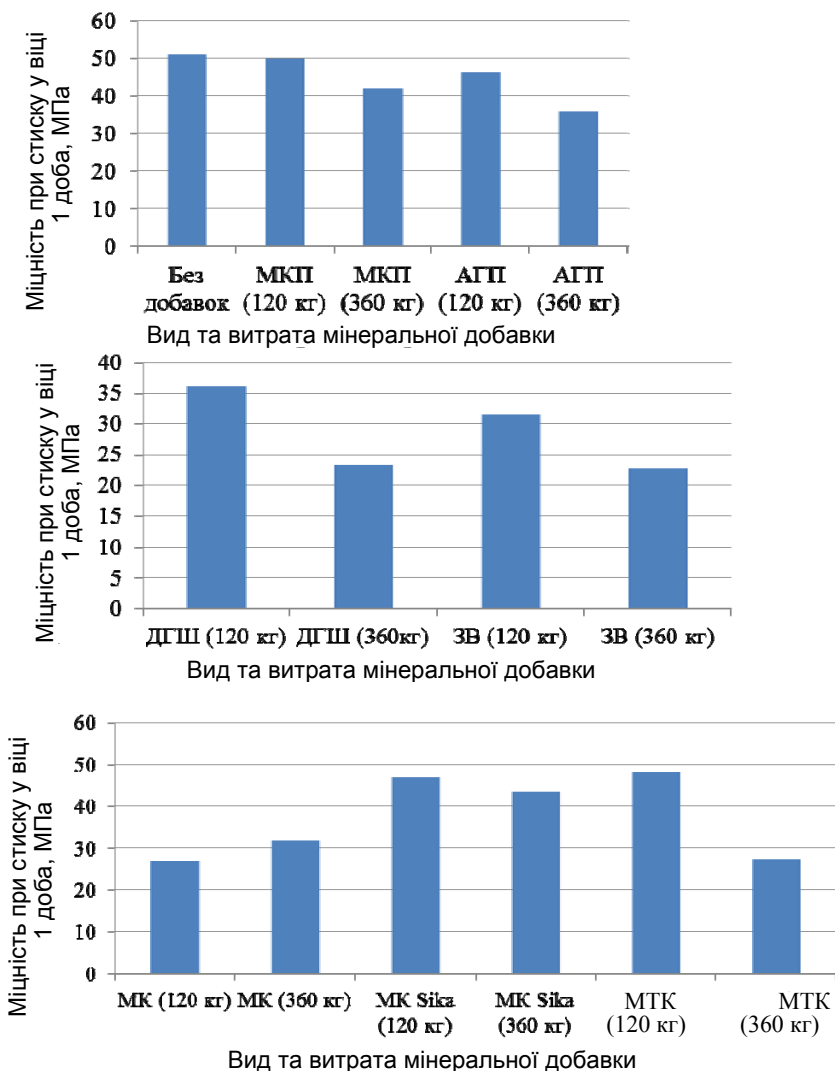
Вплив різних видів мінеральних добавок на міцність РПБ при стиску і при згині

№	Це- мент кг/м <sup>3</sup>	Пісок фрак- ції 0,16... 1,25 мм, кг/м <sup>3</sup>	Міне- раль- на до- бав- ка, кг/м <sup>3</sup>	Вит- рата води, л/м <sup>3</sup>	В/Ц	Роз- плив см	Міцність бетону у віці діб					
							f <sub>c,tf</sub> <sup>1</sup> , МПа	f <sub>cm</sub> <sup>1</sup> , МПа	f <sub>c,tf</sub> <sup>7</sup> , МПа	f <sub>cm</sub> <sup>7</sup> , МПа	f <sub>c,tf</sub> <sup>28</sup> , МПа	f <sub>cm</sub> <sup>28</sup> , МПа
Мікрокремнезем SikaFume-HR/TU (МК Sika) (S <sub>n</sub> =23158 см <sup>2</sup> /г)												
1	1080	1200	120	240	0,22	30	10,1	47	25,6	95	29,7	143
2	840	1200	360	240	0,29	12	12,7	43,3	28,2	125,5	32,2	162,4
Мелений кварцовий пісок (МКП) (S <sub>n</sub> =3786 см <sup>2</sup> /г)												
3	1080	1200	120	240	0,22	30	7,57	49,8	22,34	71,0	26,8	117,6
4	840	1200	360	240	0,29	30	8,72	41,8	18,60	74,5	22,3	111,5
Аспіраційний гранітний пил (АГП) (S <sub>n</sub> =2367 см <sup>2</sup> /г)												
5	1080	1200	120	252	0,23	10	8,81	46,1	20,65	75,3	24,8	107,6
6	840	1200	360	240	0,29	25	8,19	35,8	21,27	71,8	25,5	104,4
Доменний гранульований шлак (ДГШ) (S <sub>n</sub> =2725 см <sup>2</sup> /г)												
7	1080	1200	120	240	0,22	15	6,19	36,1	20,83	82,4	24,9	113,8
8	840	1200	360	240	0,29	25	5,83	23,3	15,66	80,1	18,8	118,0
Зола виносу ТЕС (ЗВ) (S <sub>n</sub> =2527 см <sup>2</sup> /г)												
9	1080	1200	120	240	0,22	30	6,46	31,5	19,22	70,3	23,1	100,9
10	840	1200	360	240	0,29	30	4,76	22,8	15,22	68,5	18,3	114,5
	700		300	330	0,33							82,1
11	1080	1200	120	240	0,22	30	7,65	26,9	12,46	76,5	19,9	110,3
12	840	1200	360	240	0,29	15	7,12	31,9	12,46	81,0	21,8	112,9
Метакаолін (МТК) (S <sub>n</sub> =10 125 см <sup>2</sup> /г)												
13	1080	1200	120	240	0,22	30	9,8	48,1	22,7	103,1	26,6	133,4
14	840	1200	360	270	0,33	10	7,8	27,2	17,2	78,5	20,1	102,4

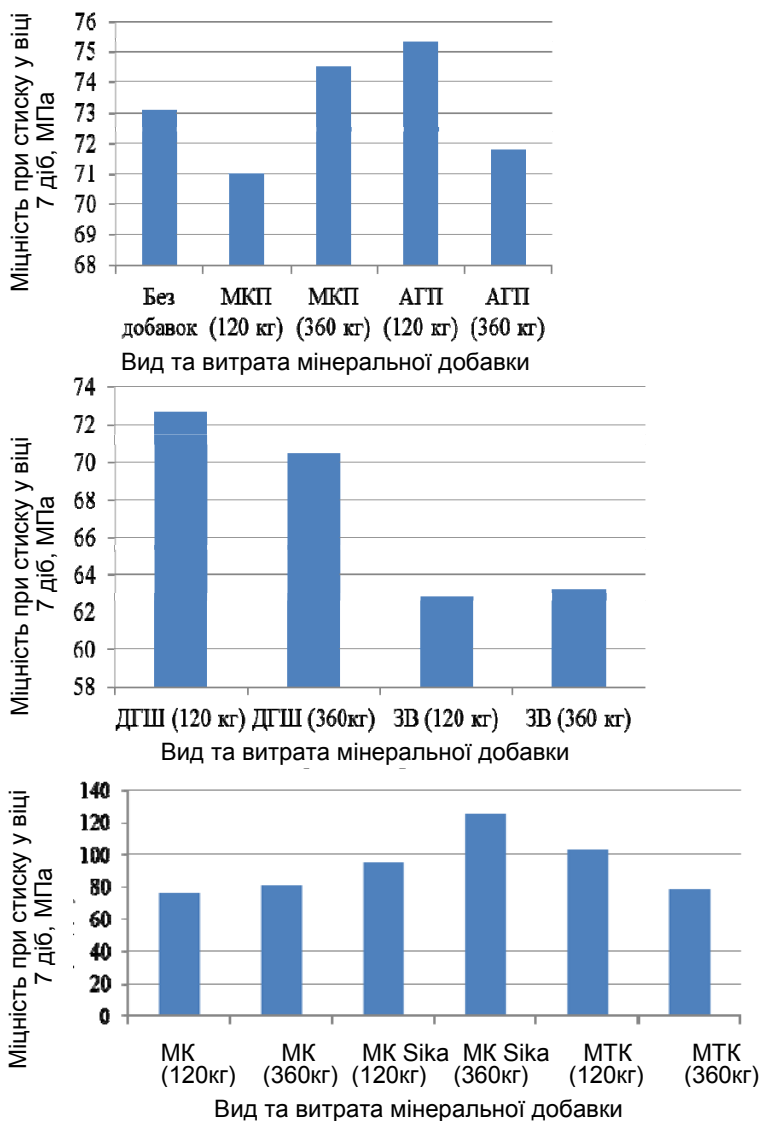
Як видно з отриманих результатів, РПБ заданим складом (табл. 3.4), виготовлений з високотекучих сумішей при максимальному вмісті мікрокремнезему SikaFume-HR/TU 360 кг/м<sup>3</sup> на 28-му добу нормального твердіння досягає міцності при стиску 162,4 МПа, що узгоджується з відомими даними [4; 8]. Часткова чи повна заміна мікрокремнезему даної марки іншими досліджуваними добавками дає можливість отримати бетон зі значеннями міцності, що знаходяться у діапазоні 104...160 МПа. Такі значення міцності, при забезпеченні високої текучості, вказують на те, що отриманий матеріал повинен характеризуватися високими технологічністю та експлуатаційними характеристиками в умовах дії різних навантажень, що виникають при роботі споруд.

Міцність при згині для усіх досліджених серіях зразків знаходилась у межах від 18,3 до 32,2 МПа. Звертають на себе увагу досить високі значення співвідношення міцності РПБ при згині до міцності при стиску ( $f_{cm}/f_{c,tf}$ ) – 4,0...5,0. Як відомо [67], даний показник характеризує стійкість бетону до утворення тріщин і його деформативність. Для звичайних бетонів співвідношення  $f_{cm}/f_{c,tf}$  зазвичай знаходиться у межах 7...8, для дрібнозернистих – дещо нижче 5...6. Підвищена тріщиностійкість і тому деформативність РПБ є визначальними властивостями, котрі дозволяють рекомендувати ці бетони для захисних та фортифікаційних споруд.

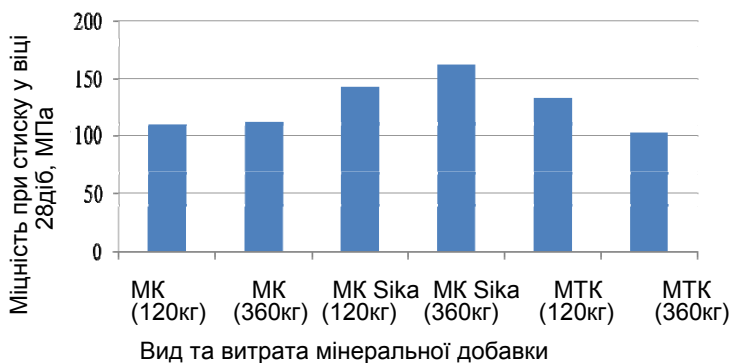
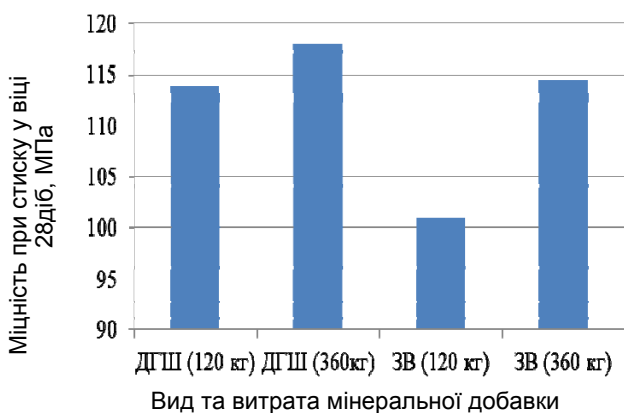
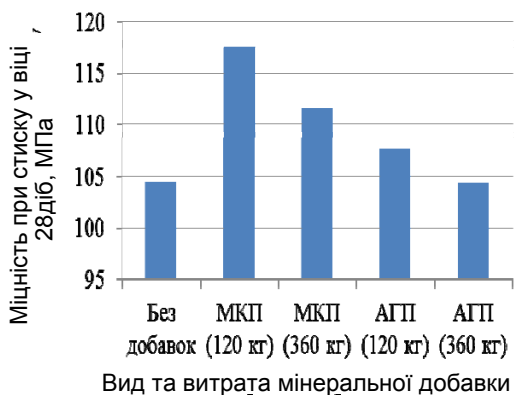
Бетон, що містив лише інертні тонкомелені добавки (мелений пісок та аспіраційний гранітний пил) характеризувався максимальною міцністю при стиску 117 МПа. Така міцність була досягнута при використанні меленого піску у кількості 120 кг/м<sup>3</sup>. Збільшення кількості меленого піску до 360 кг/м<sup>3</sup> підвищує водопотребу до 0,29 (В/Ц) і відповідно знижує міцність до 111,5 МПа.



**Рис. 1.16.** Вплив тонкомелених мінеральних добавок на міцність РПБ у віці 1 доба



**Рис. 1.17.** Вплив тонкомелених мінеральних добавок на міцність РПБ у віці 7 діб



**Рис. 1.18.** Вплив тонкомелених мінеральних добавок на міцність РПБ у віці 28 днів



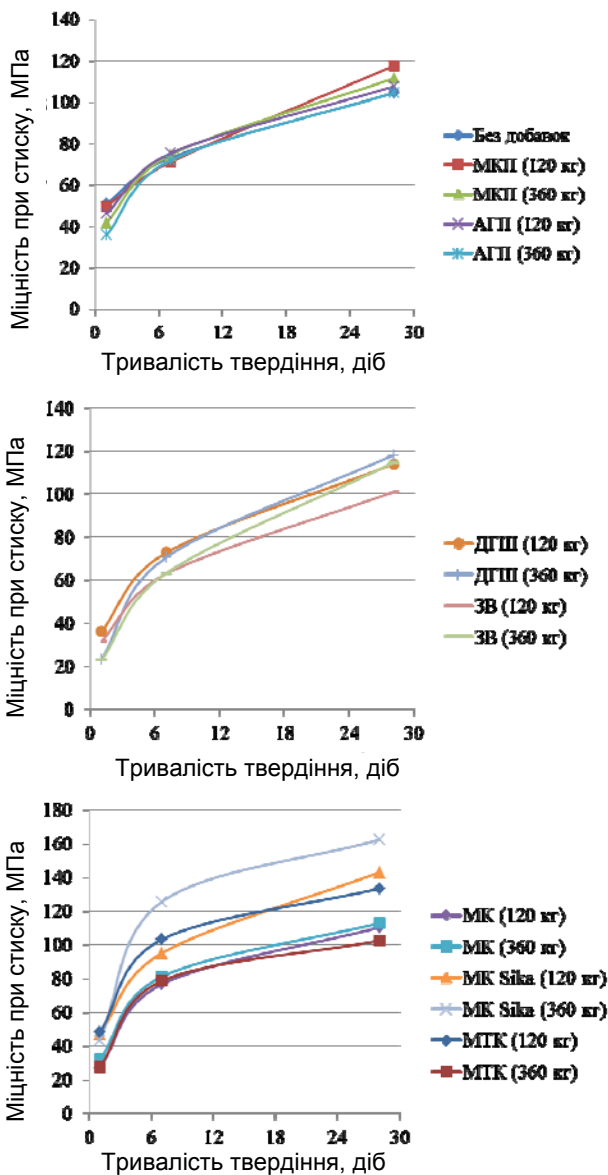
Добавка аспіраційного гранітного пилу у більший мірі знижує рухомість бетонної суміші ніж мелений пісок, ймовірно через присутність у його складі деякої кількості глини. Міцність при стиску у даному випадку знижується до 104...107 МПа.

На відміну від інертних добавок, де збільшення вмісту яких викликало погіршення текучості та зниження міцності, у випадку золи і шлаку максимальна міцність досягалась при збільшенні вмісту добавок до 360 кг/м<sup>3</sup>, причому у більш пізньому віці. Зола-виносу, внаслідок своєрідної форми зерен [76] проявляє деяку пластифікуючу дію, що дозволяє зберегти низькі значення В/Ц та щільну структуру цементного каменю навіть при високих витратах.

Максимальне підвищення міцності було досягнуто за рахунок використання високоактивних добавок мікрокремнезему та метаксаоліну. У найбільшій мірі проявив себе мікрокремнезем SikaFume-HR/TU (максимальна міцність при стиску, при максимальній його витраті 360 кг/м<sup>3</sup> – 162,4 МПа), дещо меншу ефективність показала добавка метаксаоліну (133,4 МПа). Тонкомелений кремнезем українського виробництва (м. Дніпро), котрий виробники позиціонують як аналог мікрокремнезему показав значення міцності на рівні меленого піску.

Слід відмітити, що максимальна ефективність добавки метаксаоліну спостерігається при витраті близько 10% від маси цементу, такий результат підтверджує дані отримані нами раніше, при дослідженні високоміцних бетонів [142; 143]. Подальше підвищення кількості метаксаоліну призводить до збільшення водопотреби бетонної суміші і міцність бетону знижується (рис. 1.18).

Кінетика набору міцності РПБ (рис. 1.19) в основному відповідає відомим даним для [8]. Максимальною швидкістю твердіння відрізнялись серії, що містили мікрокремнезем SikaFume-HR/TU (витрата 360 кг/м<sup>3</sup>) та метаксаолін (витрата 120 кг/м<sup>3</sup>). Слід відмітити, що усі серії, що характеризувались максимальною міцністю, на першу добу досягли міцності в межах від 40 до 48 МПа. Таку міцність можна вважати достатньою для швидкісного зведення споруд.



**Рис. 1.19.** Кінетика наростання міцності РПБ з різними тонкомеленими добавками

Характер впливу різних видів мінеральних добавок на міцність РПБ при згині (рис. 1.20...1.23) майже такий як на міцність при стиску. Максимальну міцність при згині ( $f_{c,tf}$ ) мають композити, що містять мікрокремнезем SikaFume-HR/TU (29-32 МПа), дещо нижчу – з метакаоліном та меленим піском (26-27 МПа).

Найбільш ефективними складами з позиції виходу міцності з одного кілограми цементу  $C_f$  виявились композиції, що містять підвищену кількість мікрокремнезему SikaFume-HR/TU, золи-виносу, меленого шлаку та меленого піску (табл. 1.9).

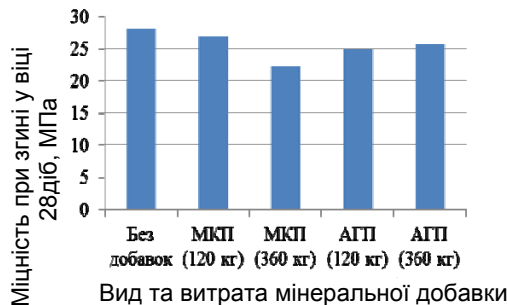
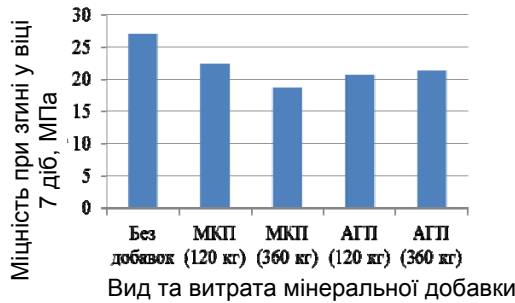
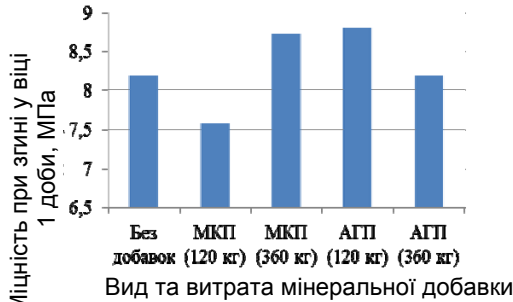
Таблиця 1.9

Вплив різних видів мінеральних добавок на критерій ефективності міцності

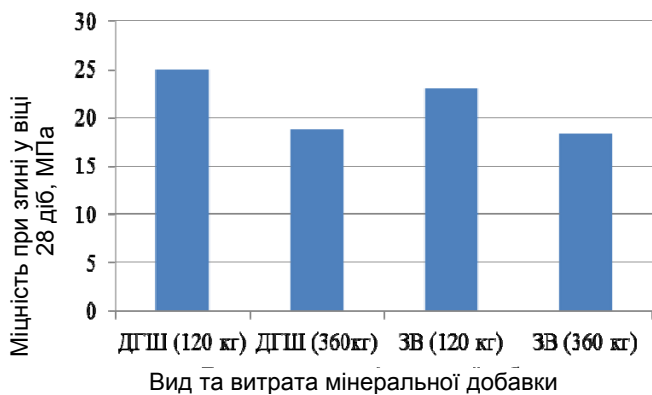
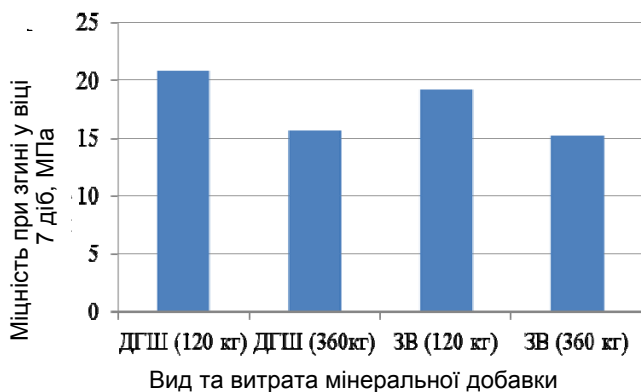
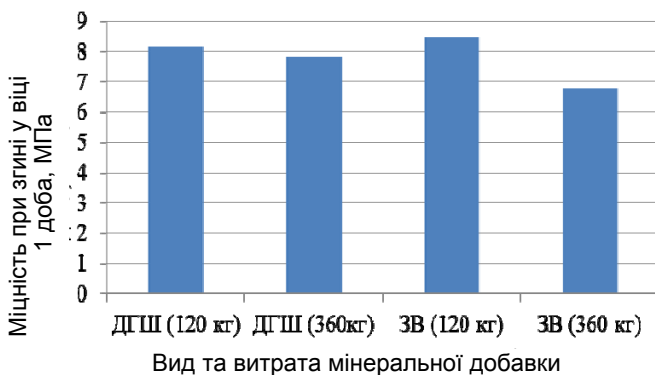
№	Це-мент, кг/м³	Пі-сок фракції 0,16...1,25 мм, кг/м³	Мі-не-раль-на до-бав-ка, кг/м³	Вит-рата води л/м³	В/Ц	Роз-плив см	Міцність бетону у віці діб					
							$f_{cm}^1 / f_{c,tf}^1$	$f_{cm}^7 / f_{c,tf}^7$	$f_{cm}^{28} / f_{c,tf}^{28}$	$C_{cm}^1$ , кг/МПа	$C_{cm}^7$ , кг/МПа	$C_{cm}^{28}$ , кг/МПа
Мікрокремнезем SikaFume-HR/TU (МК Sika) ( $S_n=23158 \text{ см}^2/\text{г}$ )												
1	1080	1200	120	240	0,22	30	2,7	3,7	4,8	40,0	11,4	7,6
2	840	1200	360	240	0,29	12	2,6	4,5	5,0	25,2	6,7	5,2
Мелений кварцовий пісок (МКП) ( $S_n=3786 \text{ см}^2/\text{г}$ )												
3	1080	1200	120	240	0,22	30	6,6	3,2	4,4	19,3	13,5	8,2
4	840	1200	360	240	0,29	30	4,8	4,0	5,0	17,9	10,0	6,7
Аспіраційний гранітний пил (АГП) ( $S_n=2367 \text{ см}^2/\text{г}$ )												
5	1080	1200	120	252	0,23	10	5,2	3,6	4,3	20,8	12,8	8,9
6	840	1200	360	240	0,29	25	4,4	3,4	4,1	20,9	10,4	7,2
Доменний гранульований шлак (ДГШ) ( $S_n=2725 \text{ см}^2/\text{г}$ )												
7	1080	1200	120	240	0,22	15	5,6	4,0	4,6	20,8	11,7	8,4
8	840	1200	360	240	0,29	30	4,3	5,1	6,3	22,5	9,3	6,3
Зола виносу ТЕС (ЗВ) ( $S_n=2527 \text{ см}^2/\text{г}$ )												
9	1080	1200	120	240	0,22	30	4,9	3,7	4,4	23,2	13,7	9,5
10	840	1200	360	240	0,29	30	4,8	4,5	6,3	22,8	10,9	6,5

продовження табл. 1.9

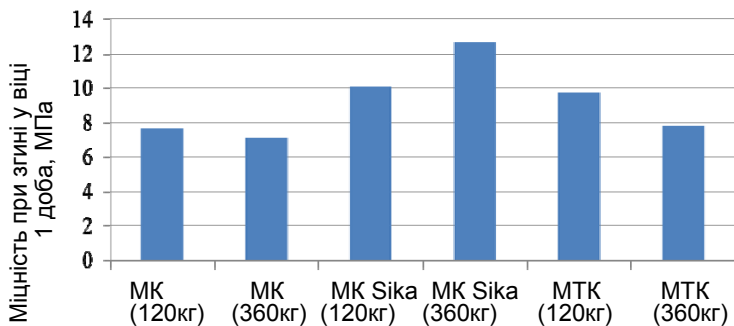
Тонкомелений кремнезем (МК) ( $S_n=21094 \text{ см}^2/\text{г}$ )													
11	1080	1200	120	240	0,22	30	3,5	6,1	5,6	35,8	12,6	8,7	
12	840	1200	360	240	0,29	15	4,5	6,5	5,2	23,5	9,2	6,6	
Метакаолін (МТК) ( $S_n=10 \text{ 125 см}^2/\text{г}$ )													
13	1080	1200	120	240	0,22	30	4,9	4,5	5,0	22,5	10,5	8,1	
14	840	1200	360	270	0,33	10	3,5	4,6	5,1	30,9	10,7	8,2	



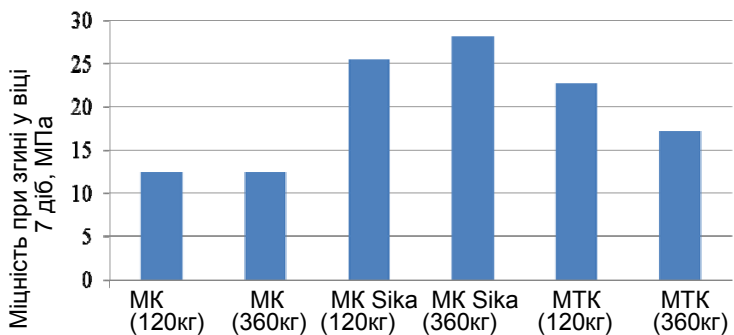
**Рис. 1.20.** Вплив інертних мінеральних добавок на міцність РПБ при згині



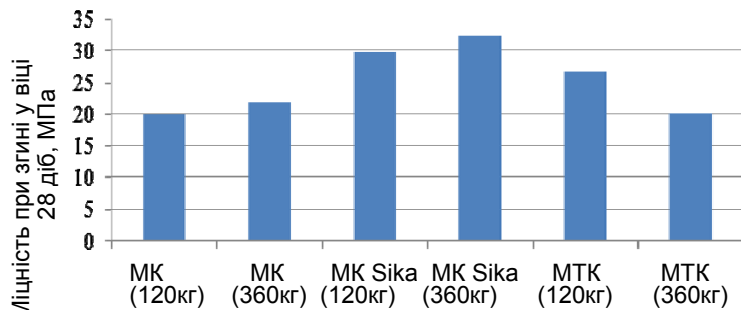
**Рис. 1.21.** Вплив золи-виносу та доменного шлаку на міцність РПБ при згині



Вид та витрата мінеральної добавки



Вид та витрата мінеральної добавки



Вид та витрата мінеральної добавки

**Рис. 1.22.** Вплив активних мінеральних добавок на міцність РПБ при згині

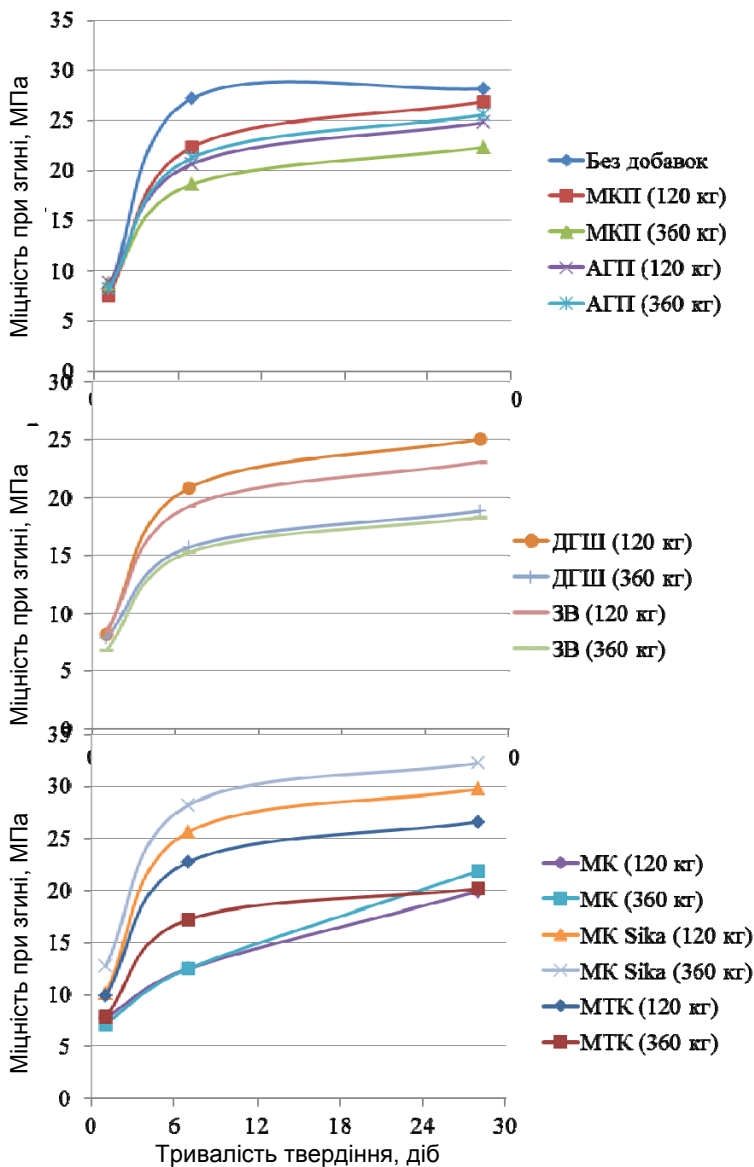


Рис. 1.23. Кінетика набору міцності РПБ з різними видами активних мінеральних добавок

Враховуючи вартість, використання таких добавок як золи-виносу, мелений шлак та мелений пісок може бути найбільш виправдане з економічної точки зору.

З огляду про встановлену ефективність для РПБ, мінеральних добавок різної активності як інертних, так і активних, проведено серію дослідів на встановлення їх спільного впливу на міцнісні властивості бетону. При виконанні даної серії досліджень склад реакційно-здатного порошкового бетону не змінювався та був прийнятий наступним: витрата цементу –  $840 \text{ кг/м}^3$ , мінеральної добавки –  $360 \text{ кг/м}^3$ , піску фракції  $0,16...1,25 \text{ мм}$  –  $1200 \text{ кг/м}^3$ , витрата суперпластифікатора поліакрилатного типу Dynamon SP-3 – 2% від маси в'язучого. Витрати води визначалися із умови забезпеченості заданого розпливу  $25...30 \text{ см}$  по віскозиметру Суттарда. В якості мінеральних добавок були використані мелений кварцовий пісок (МКП), доменний гранульований шлак (ДГШ) та зола виносу (ЗВ). Додатково до складу бетону вводились добавки метакаліну та цеоліту в кількості 5, 10 та 15% від маси цементу. Отримані результати (табл. 1.10, рис. 1.24...1.27) вказують на те, що найбільший вплив на міцність РПБ здійснює додаткове введення добавки метакаліну – міцність бетону при стиску підвищується до  $122...126 \text{ МПа}$ . При цьому збільшення вмісту метакаліну більше 10% від маси цементу є неефективним внаслідок суттєвого підвищення в'язкості суміші і збільшення водопотреби. Найбільш ефективною добавкою в комплексі з метакаліном можна вважати золу-виносу. Позитивний вплив золи на рухомість бетонних сумішей деякою мірою компенсує підвищення в'язкості, властиве метакаліну [142].

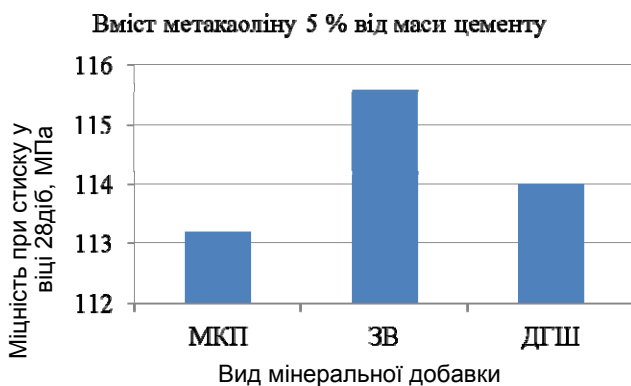
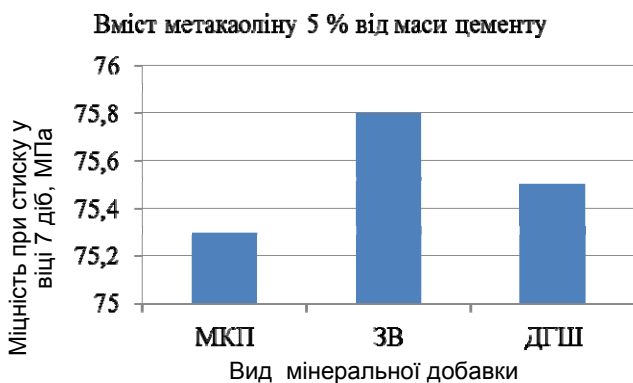
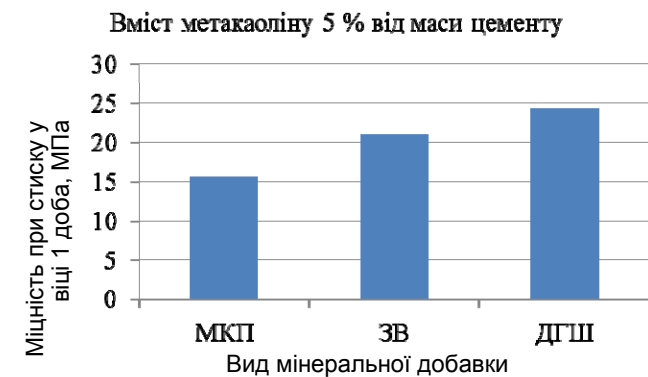
Ефективність досліджених комплексів мінеральних добавок з позиції збільшення міцності при згині аналогічна. Максимальні значення  $f_{c,tf}$  ( $23\text{-}25 \text{ МПа}$ ) досягнуті при поєднанні метакаліну у кількості 10% від маси цементу з золою-виносу Бурштинської ТЕС.



Таблиця 1.10

Дослідження впливу метаксаоліну та інших мінеральних добавок  
на міцнісні характеристики  
реакційно-здатного порошкового бетону

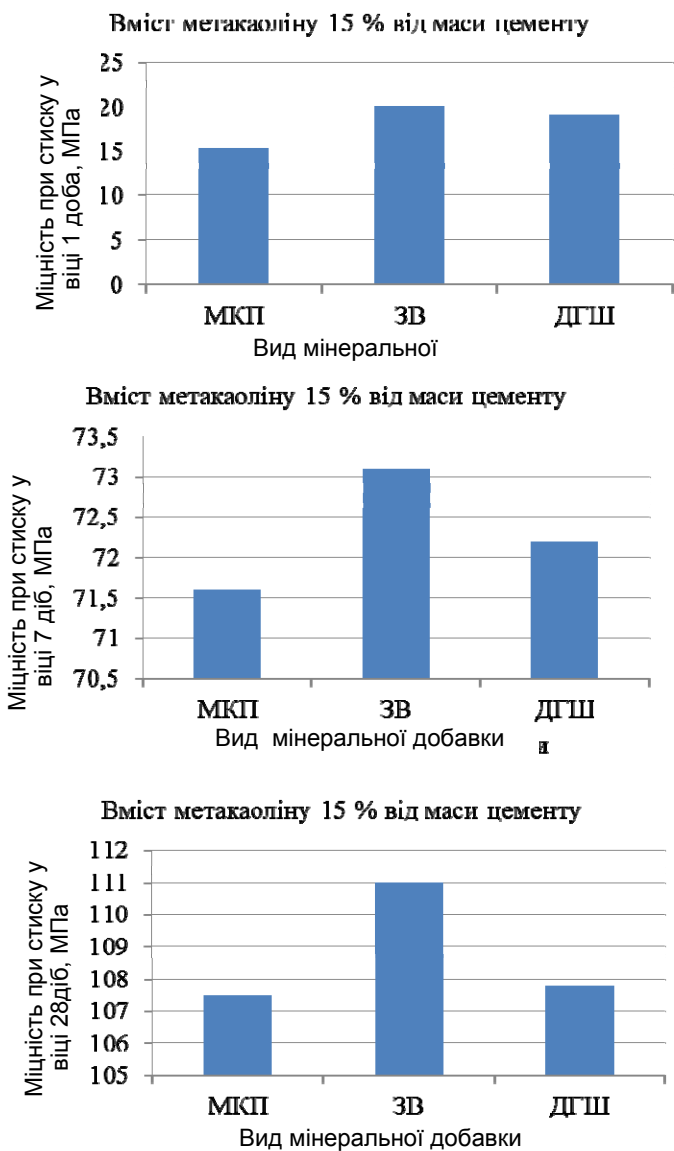
№	Вид мінеральної добавки, кг/м <sup>3</sup>	В/Ц	Роз- плив, см	Міцність бетону у віці діб					
				f <sub>c,tf</sub> <sup>1</sup> , МПа	f <sub>cm</sub> <sup>1</sup> , МПа	f <sub>c,tf</sub> <sup>7</sup> , МПа	f <sub>cm</sub> <sup>7</sup> , МПа	f <sub>c,tf</sub> <sup>28</sup> , МПа	f <sub>cm</sub> <sup>28</sup> , МПа
Вміст метаксаоліну 5% від маси цементу									
1	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,29	30	7,12	15,7	16,29	75,3	22,36	113,2
2	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,29	30	7,21	21,0	17,09	75,8	22,77	115,6
3	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,29	30	6,32	24,4	16,82	75,5	22,26	114,0
Вміст метаксаоліну 10% від маси цементу									
4	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,29	30	7,48	22,8	18,78	79,4	23,32	122,6
5	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,29	30	7,65	29,2	18,87	79,9	25,28	126,2
6	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,29	30	7,57	24,7	17,53	78,9	19,76	125,0
Вміст метаксаоліну 15% від маси цементу									
7	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,29	30	6,94	15,3	15,49	71,6	21,21	107,5
8	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,29	30	7,12	20,1	16,91	73,1	21,81	111,0
9	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,29	30	6,68	19,1	16,02	72,2	20,90	107,8



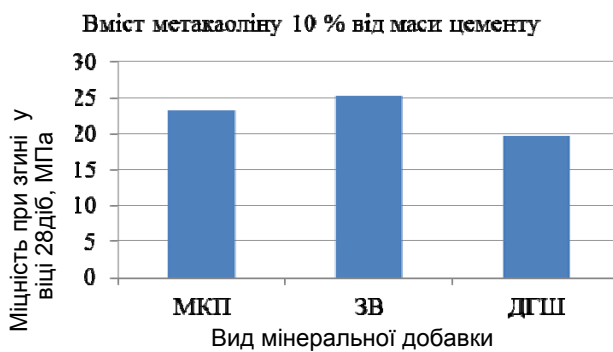
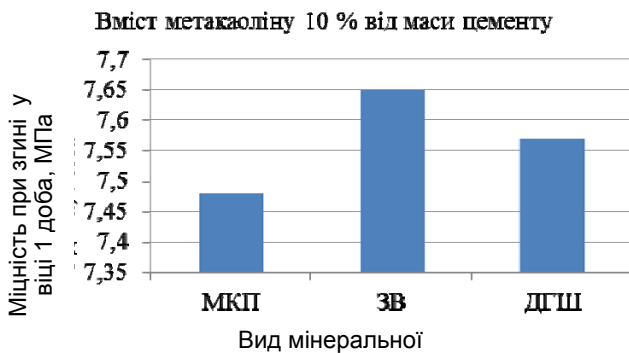
**Рис. 1.24.** Вплив 5% метаксаоліну в комплексі з іншими мінеральними добавками на міцність при стиску РПБ



**Рис. 1.25.** Вплив 10% метакіаоліну в комплексі з іншими мінеральними добавками на міцність при стиску РПБ



**Рис. 1.26.** Вплив 15% метаксаоліну в комплексі з іншими мінеральними добавками на міцність при стиску РПБ



**Рис. 1.27.** Вплив 10% метакваоліну в комплексі з іншими мінеральними добавками на міцність РПБ при згині

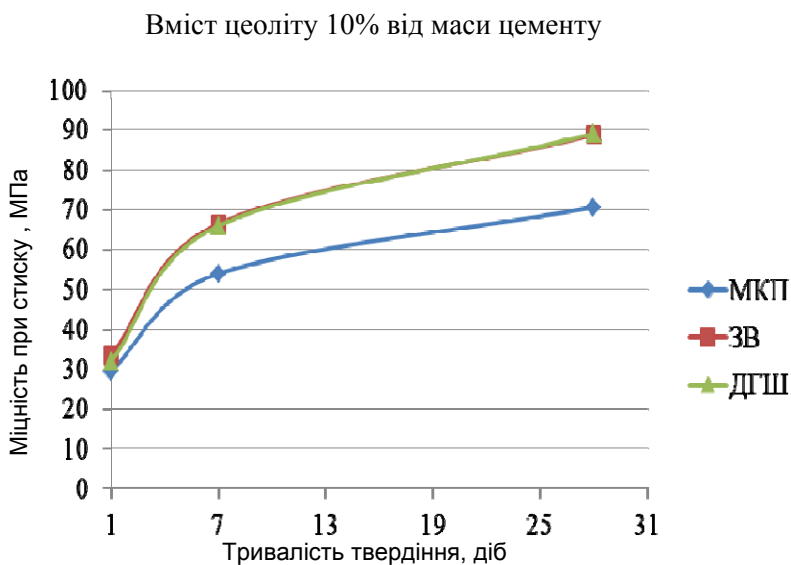
Однією з речовин, що містять в своєму складі значну кількість активного кремнезему і володіють високими адсорбційними властивостями, є цеолітовий туф, родовища якого розробляються на Закарпатті. Цеоліт – природний мінерал вулканічного походження клиноптіллолітового типу класу мікропористих каркасних алюмосилікатів з розміщеними у внутрішньокристалічному просторі обмінними катіонами лужних і лужноземельних металів і молекул води. Відомо [144], що цеолітові туфи проявляють пуцоланові властивості і здатні до реакцій заміщення з гідроксидом кальцію.

Як показують отримані результати (табл. 3.17, 3.18), бетони, що містили добавку цеоліту, відрізнялись підвищеною водопотребою (від  $V/C=0,31$  – при вмісті цеоліту 5% від цементу до  $V/C=0,38...0,4$  – при 15%). Відповідно до цього міцність РПБ з цеолітом приймала нижчі значення, ніж з метакаоліном та іншими мінеральними добавками. Максимальні значення міцності при стиску знаходились у межах 93...97 МПа при вмісті цеоліту не більше 5% від цементу. Як відомо [144] висока дисперсність цеолітових порід призводить до значного підвищення водопотреби бетону, тому використання їх відомо лише для бетонів невисоких класів (B7,5...B30). Одночасне введення цеолітових туфів разом з суперпластифікаторами, що в значній мірі знижують водовміст, може створювати певні передумови для ефективного їх застосування в високоміцних бетонах.

Таблиця 1.11

Результати визначення впливу цеоліту на міцність РПБ

№	Вид мінеральної добавки, кг/м <sup>3</sup>	В/Ц	Роз- плив, см	Міцність бетону у віці діб					
				f <sub>c,tf</sub> <sup>1</sup> , МПа	f <sub>cm</sub> <sup>1</sup> , МПа	f <sub>c,tf</sub> <sup>7</sup> , МПа	f <sub>cm</sub> <sup>7</sup> , МПа	f <sub>c,tf</sub> <sup>28</sup> , МПа	f <sub>cm</sub> <sup>28</sup> , МПа
Вміст цеоліту 5% від маси цементу									
1	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,31	25	7,30	36,1	12,10	61,6	13,88	93,7
2	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,31	30	9,35	39,0	12,19	68,0	18,42	96,3
3	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,31	30	8,37	36,6	12,19	66,9	17,36	94,4
Вміст цеоліту 10% від маси цементу									
4	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,36	30	6,68	29,5	10,77	53,9	14,33	70,5
5	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,34	30	8,28	33,5	12,02	66,4	17,09	88,7
6	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,35	30	7,74	31,9	11,30	65,9	16,20	89,0
Вміст цеоліту 15% від маси цементу									
7	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,4	30	5,87	26,3	9,70	47,7	12,82	63,5
8	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,38	30	7,03	30,1	10,77	59,8	15,66	80,0
9	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,39	30	6,32	28,6	10,06	57,0	14,42	76,0



**Рис. 1.28.** Кінетика наростання міцності при стиску РПБ, що містить цеоліт



**Рис. 1.29.** Кінетика наростання міцності при згині РПБ, що містить цеоліт



### **1.6.2. Аналіз впливу комплексу технологічних факторів, що впливають на міцність реакційно-порошкових бетонів**

На даному етапі досліджень, було вивчено комплексний вплив на міцність реакційно-порошкових бетонів (РПБ) витрати цементу, вмісту активної мінеральної добавки та добавки суперпластифікатора.

Основні дослідження були виконані із застосуванням математичного планування експерименту. Для цього був реалізований тривірневий трифакторний план  $B_3$  [145]. Умови планування та результати експериментальних досліджень наведені в табл. 1.12...1.14.

В якості сировинних матеріалів, для проведення експериментальних досліджень, було використано портландцемент ПЦ-I М500 виробництва ПАТ «Волинь-Цемент», м. Здолбунів. Кількість цементу варіювалась та складала 720, 840 та 960 кг/м<sup>3</sup> бетонної суміші. Додатково до складу бетону вводились активні мінеральні добавки, вміст яких змінювався в діапазоні від 20 до 40% від маси цементу. В якості активних мінеральних добавок, було використано золу виносу Бурштинської ТЕС та доменний гранульований шлак Криворізького металургійного комбінату.

Попередніми дослідженнями було встановлено, що введення даних добавок позитивно впливає на міцність реакційно-порошкових бетонів, а їх вартість порівняно із вартістю мікрокремнезему та метакаоліну, як основних компонентів таких бетонів, є суттєво нижчою. Більш сильний вплив даних добавок на міцність РПБ, порівняно із іншими використаними добавками (мелений кварцовий пісок та гранітний аспіраційний пил) пояснюється їх гідравлічною активністю.

В якості заповнювача при виготовленні РПБ було використано кварцовий пісок Нетішинського кар'єру фракції 0,16...1,25 мм. Для максимального зменшення водопотреби і відповідного підвищення міцності РПБ, при замішуванні бетонних сумішей до їх складу вводилась добавка суперпластифікатора поліакрилатного типу Dynamon SP-3, вміст

якої змінювався в діапазоні 1...2% від маси в'язучого у відповідності з прийнятими умовами планування експерименту. Витрати води в кожній точці плану визначалися із умови забезпеченості заданого розпливу 25...30 см по віскозиметру Суттарда.

Таблиця 1.12

Умови планування експерименту

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал
	Код	Натуральний вид	-1	0	+1	
1	X <sub>1</sub>	Витрата цементу (Ц), кг/м <sup>3</sup>	720	840	960	120
2	X <sub>2</sub>	Відношення мінеральної добавки (наповнювача) до цементу (Н/Ц)	0,2	0,3	0,4	0,1
4	X <sub>3</sub>	Витрата суперпластифікатора (СП) Dynamon SP-3, %	1	1,5	2	0,5

Після проведення обробки і статистичного аналізу експериментальних даних (табл. 1.10, 1.14) отримані математичні моделі водопотреби, водоцементного відношення, та міцності РПБ на стиск та згин у віці 1, 7 та 28 діб у вигляді поліноміальних рівнянь регресії (табл. 1.15).

Таблиця 1.13

Результати експериментальних досліджень комплексного впливу  
на міцність РПБ витрати цементу, вмісту золи виносу ТЕС та добавки суперпластифікатора

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Ц, кг/м <sup>3</sup>	З, кг/м <sup>3</sup>	П, кг/м <sup>3</sup>	СП, кг/м <sup>3</sup>	В, л/м <sup>3</sup>	В/ В'яж	В/Ц	f <sub>ctf</sub> <sup>1</sup> , МПа	f <sub>cm</sub> <sup>1</sup> , МПа	f <sub>ctf</sub> <sup>7</sup> , МПа	f <sub>cm</sub> <sup>7</sup> , МПа	f <sub>ctf</sub> <sup>28</sup> , МПа	f <sub>cm</sub> <sup>28</sup> , МПа
1	1	1	1	960	384	1824	26,88	250	0,19	0,26	8,29	32,9	13,72	72,3	23,67	111,8
2	1	1	-1	960	384	1824	26,88	278	0,21	0,29	7,72	29,7	12,44	57,6	22,59	99,3
3	1	-1	1	960	192	1632	23,04	230	0,20	0,24	8,90	35,6	14,93	73,1	23,35	112,1
4	1	-1	-1	960	192	1632	23,04	250	0,22	0,26	7,87	32,2	13,83	62,1	23,89	101,3
5	-1	1	1	720	288	1968	20,16	209	0,21	0,29	7,05	25,4	12,82	56,6	22,56	104,6
6	-1	1	-1	720	288	1968	20,16	223	0,22	0,31	6,07	21,9	11,48	55,8	21,48	93,6
7	-1	-1	1	720	144	1824	17,28	187	0,22	0,26	7,65	28,1	14,07	57,3	22,27	105,5
8	-1	-1	-1	720	144	1824	17,28	209	0,24	0,29	6,23	24,4	12,91	60,4	22,79	96,2
9	1	0	0	960	288	1728	24,96	259	0,21	0,27	8,71	36,8	15,11	70,4	24,10	115,2
10	-1	0	0	720	216	1896	18,72	209	0,22	0,29	7,27	29,2	14,20	61,7	23,00	108,4
11	0	1	0	840	336	1896	23,52	244	0,21	0,29	7,41	30,9	12,64	61,1	22,30	106,7
12	0	-1	0	840	168	1728	20,16	227	0,23	0,27	7,79	33,5	13,96	63,8	22,80	108,2
13	0	0	1	840	252	1812	21,84	218	0,20	0,26	8,22	35,7	14,64	65,5	23,19	114,7
14	0	0	-1	840	252	1812	21,84	235	0,22	0,28	7,22	32,3	13,41	59,6	22,89	103,8
15	0	0	0	840	252	1812	21,84	235	0,22	0,28	7,92	35,2	14,35	64,6	23,15	112,6
16	0	0	0	840	252	1812	21,84	235	0,22	0,28	7,92	35,2	14,35	64,6	23,15	112,6
17	0	0	0	840	252	1812	21,84	235	0,22	0,28	7,92	35,2	14,35	64,6	23,15	112,6

Таблиця 1.14

Результати експериментальних досліджень комплексного впливу на міцність РПБ витрати цементу, вмісту доменного гранульованого шлаку та добавки суперпластифікатора

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Ц, кг/м <sup>3</sup>	ДГШ, кг/м <sup>3</sup>	П, кг/м <sup>3</sup>	СП, кг/м <sup>3</sup>	В, л/м <sup>3</sup>	В/Вж	В/Ц	f <sub>c.tf</sub> <sup>1</sup> , МПа	f <sub>cm</sub> <sup>1</sup> , МПа	f <sub>c.tf</sub> <sup>7</sup> , МПа	f <sub>cm</sub> <sup>7</sup> , МПа	f <sub>c.tf</sub> <sup>28</sup> , МПа	f <sub>cm</sub> <sup>28</sup> , МПа
1	1	1	1	960	384	1824	26,88	250	0,19	0,26	7,31	24,3	12,73	76,3	24,13	102,5
2	1	1	-1	960	384	1824	26,88	278	0,21	0,29	7,05	20,4	11,91	67,5	23,14	94,9
3	1	-1	1	960	192	1632	23,04	230	0,20	0,24	8,11	31,1	11,59	82,6	22,86	112,5
4	1	-1	-1	960	192	1632	23,04	250	0,22	0,26	7,05	27,0	11,17	77,6	23,04	106,1
5	-1	1	1	720	288	1968	20,16	209	0,21	0,29	6,49	16,0	12,25	64,2	22,85	88,4
6	-1	1	-1	720	288	1968	20,16	223	0,22	0,31	5,63	11,7	10,63	56,8	21,84	81,8
7	-1	-1	1	720	144	1824	17,28	187	0,22	0,26	7,29	23,0	11,19	70,5	21,52	98,0
8	-1	-1	-1	720	144	1824	17,28	209	0,24	0,29	5,63	18,5	9,97	66,9	21,74	92,6
9	1	0	0	960	288	1728	24,96	259	0,21	0,27	7,85	31,5	13,02	81,8	24,07	112,7
10	-1	0	0	720	216	1896	18,72	209	0,22	0,29	6,73	23,1	12,18	70,4	22,78	98,9
11	0	1	0	840	336	1896	23,52	244	0,21	0,29	6,62	18,7	11,85	66,2	22,62	97,5
12	0	-1	0	840	168	1728	20,16	227	0,23	0,27	7,02	25,5	10,95	74,4	21,92	107,9
13	0	0	1	840	252	1812	21,84	218	0,20	0,26	7,57	28,4	12,54	77,4	23,05	110,3
14	0	0	-1	840	252	1812	21,84	235	0,22	0,28	6,61	24,2	11,52	71,2	22,64	103,8
15	0	0	0	840	252	1812	21,84	235	0,22	0,28	7,19	27,1	12,30	75,2	22,95	109,2
16	0	0	0	840	252	1812	21,84	235	0,22	0,28	7,19	27,1	12,30	75,2	22,95	109,2
17	0	0	0	840	252	1812	21,84	235	0,22	0,28	7,19	27,1	12,30	75,2	22,95	109,2

Таблиця 1.15

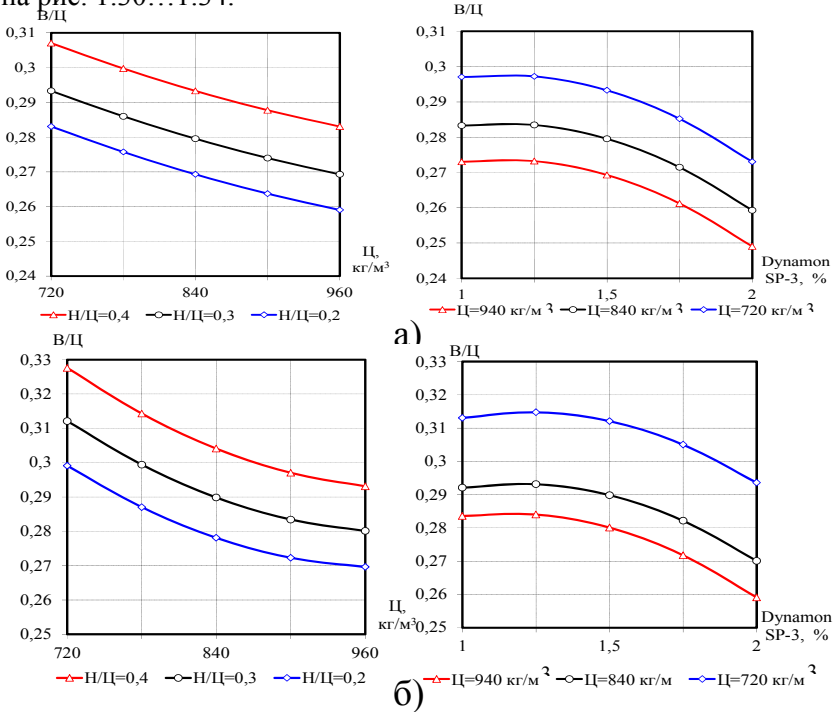
Експериментально-статистичні моделі водопотреби водоцементного відношення та міцності РПБ

РПБ виготовлені із використанням золи виносу ТЕС	
Водопотреба бетону, л/м <sup>3</sup>	$B=234,7+23X_1+10,1X_2-10,1X_3+0,2X_1^2+1,7X_2^2-7,3X_3^2+1,5X_1X_2-1,5X_1X_3 \quad (1.38)$
Водоцементне відношення	$B/C=0,28-0,012X_1+0,012X_2-0,012X_3+0,002X_1^2+0,002X_2^2-0,008X_3^2 \quad (1.39)$
Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба, МПа	$f_{c,tf}^1=7,94+0,722X_1-0,19X_2+0,5X_3+0,065X_1^2-0,318X_2^2-0,205X_3^2-0,1X_1X_2-0,113X_2X_3 \quad (1.40)$
Міцність при стиску у віці 1 доба, МПа	$f_{cm}^1=35,28+3,82X_1-1,3X_2+1,72X_3-2,2X_1^2-3,03X_2^2-1,23X_3^2-0,075X_1X_3-0,05X_2X_3 \quad (1.41)$
Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб, МПа	$f_{c,tf}^7=14,38+0,455X_1-0,66X_2+0,611X_3+0,292X_1^2-1,06X_2^2-0,338X_3^2+0,01X_1X_2-0,015X_1X_3+0,045X_2X_3 \quad (1.42)$
Міцність при стиску у віці 7 діб, МПа	$f_{cm}^7=64,55+4,38X_1-1,32X_2+2,92X_3+1,48X_1^2-2,12X_2^2-2X_3^2-3,5X_1X_3+0,95X_2X_3 \quad (1.43)$
Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа	$f_{c,tf}^{28}=23,21+0,55X_1-0,25X_2+0,14X_3+0,4X_1^2-0,6X_2^2-0,13X_3^2+0,4X_2X_3 \quad (1.44)$
Міцність при стиску у віці 28 діб, МПа	$f_{cm}^{28}=112,9+3,1X_1-0,7X_2+5,5X_3-1X_1^2-5,3X_2^2-3,5X_3^2+0,2X_1X_2+0,4X_1X_3+0,4X_2X_3 \quad (1.45)$

продовження табл. 1.15

РПБ виготовлені із використанням доменного гранульованого шлаку	
Водопотреба бетону, л/м <sup>3</sup>	$B=246,3+23,3X_1+10,4X_2-10,5X_3+0,6X_1^2+2,1X_2^2-8,4X_3^2+1,5X_1X_2-2X_1X_3-0,8X_2X_3 \quad (1.46)$
Водоцементне відношення	$B/C=0,29-0,016X_1+0,013X_2-0,011X_3+0,006X_1^2+0,001X_2^2-0,009X_3^2 \quad (1.47)$
Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба, МПа	$f_{c.tf}^1=7,21+0,56X_1-0,2X_2+0,48X_3+0,095X_1^2-0,375X_2^2-0,105X_3^2-0,15X_1X_3-0,2X_2X_3 \quad (1.48)$
Міцність при стиску у віці 1 доба, МПа	$f_{cm}^1=27,16+4,2X_1-3,4X_2+2,1X_3+0,181X_1^2-5,02X_2^2-0,82X_3^2+0,05X_1X_2-0,1X_1X_3-0,03X_2X_3 \quad (1.49)$
Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб, МПа	$f_{c.tf}^7=12,33+0,42X_1+0,45X_2+0,51X_3+0,3X_1^2-0,91X_2^2-0,3X_3^2+0,02X_1X_2-0,2X_1X_3+0,1X_2X_3 \quad (1.50)$
Міцність при стиску у віці 7 діб, МПа	$f_{cm}^7=75,37+5,7X_1-4,1X_2+3,1X_3+0,84X_1^2-4,96X_2^2-0,96X_3^2+0,35X_1X_3+0,95X_2X_3 \quad (1.51)$
Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа	$f_{c.tf}^{28}=23,0+0,651X_1+0,35X_2+0,2X_3+0,457X_1^2-0,698X_2^2+0,123X_3^2+0,3X_2X_3 \quad (1.52)$
Міцність при стиску у віці 28 діб, МПа	$f_{cm}^{28}=109,5+6,9X_1-5,2X_2+3,25X_3-3,5X_1^2-6,6X_2^2-2,25X_3^2-0,1X_1X_2+0,25X_1X_3+0,3X_2X_3 \quad (1.53)$

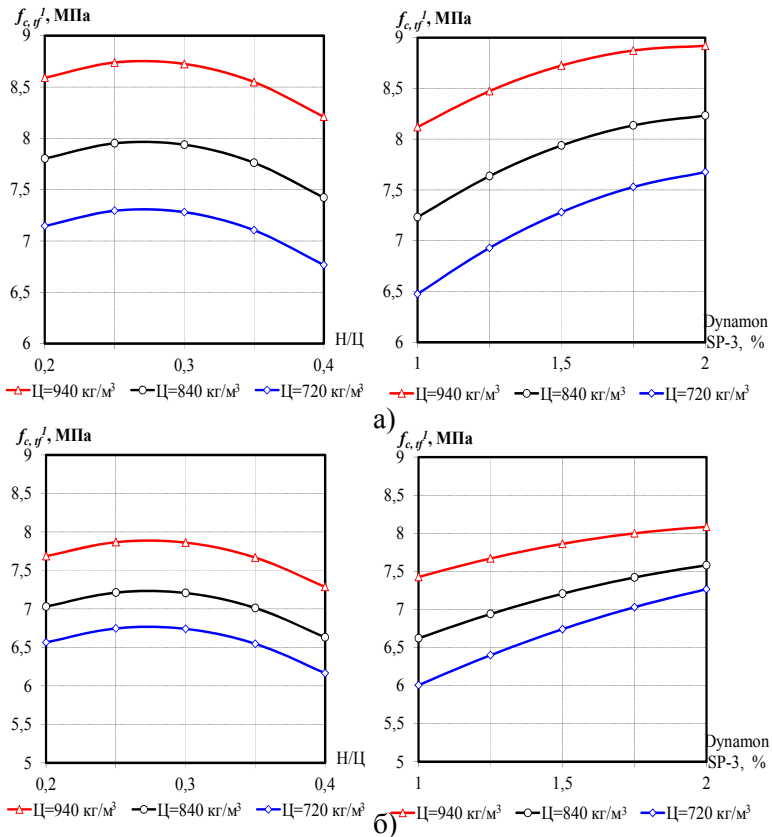
Графічні залежності, які ілюструють вплив технологічних факторів на водоцементне відношення та міцність бетону на стиск та згин у віці 1 та 28 діб нормального твердіння наведені на рис. 1.30...1.34.



**Рис. 1.30.** Вплив технологічних факторів на водоцементне відношення РПБ виготовленого із застосуванням: а) золи виносу ТЕС; б) доменного гранульованого шлаку

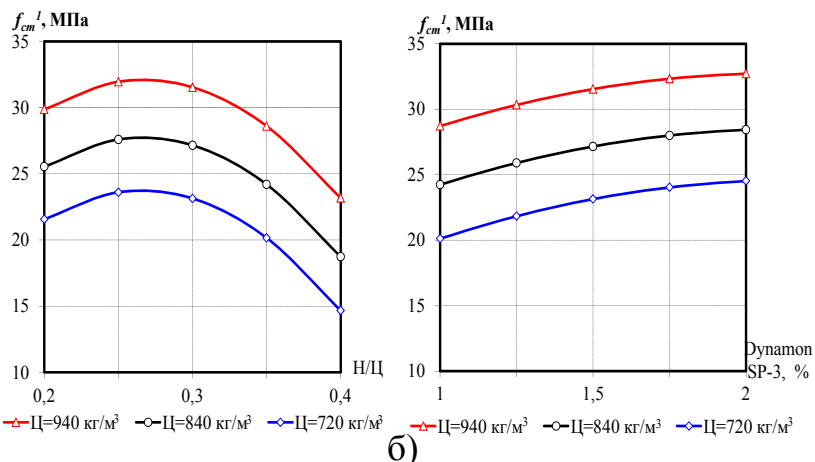
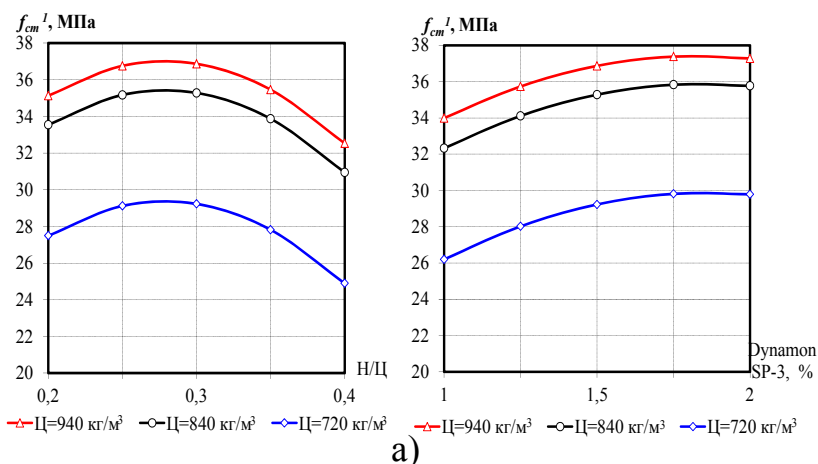
Дослідження показали, що до зменшення водоцементного відношення РПБ виготовлених із застосуванням, як золи виносу ТЕС так і доменного гранульованого шлаку, призводить збільшення витрати цементу та витрати пластифікуючої добавки. При збільшенні вмісту даних речовин у складі РПБ зменшення В/Ц в середньому складає 10...12%. До деякого зростання В/Ц призводить збільшення вмісту мінеральної добавки, що пов'язано із

зменшенням загальної кількості цементу у в'язучому. Також варто відмітити, що при використанні золи виносу ТЕС, в якості активної мінеральної добавки РПБ у всіх точках плану спостерігається зниження В/Ц в середньому на 5-7% у порівнянні із доменним гранульованим шлаком. Це пояснюється сферичною формою частинок золи, а також їх зменшеною пористістю у порівнянні із шлаком, що відповідно і призводить до додаткового пластифікуючого ефекту.

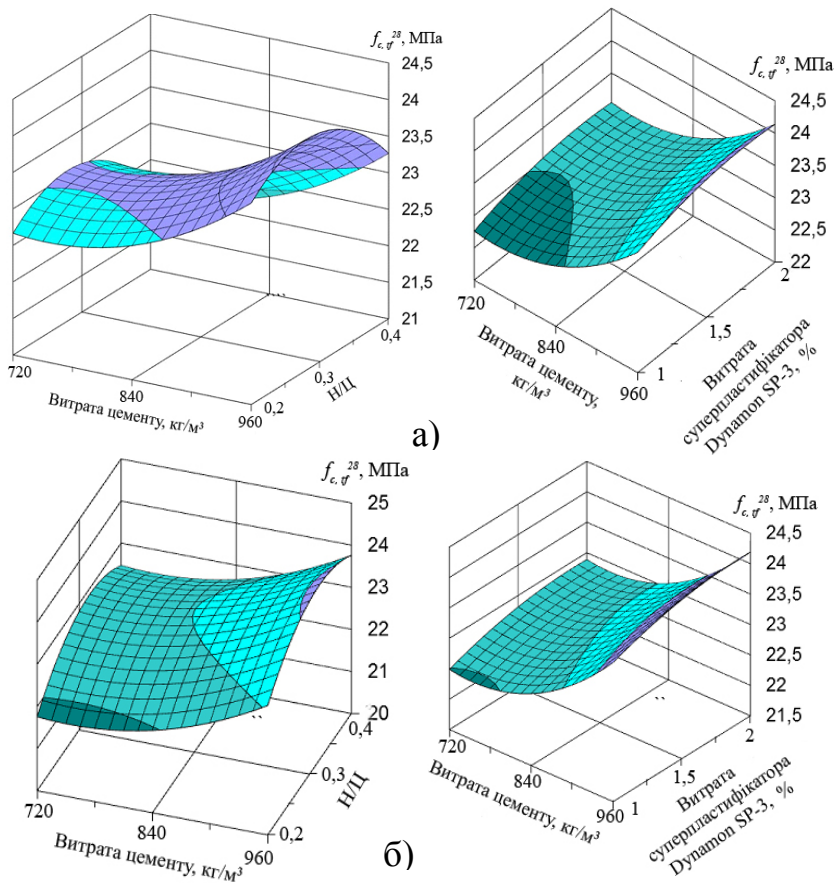


**Рис. 1.31.** Вплив технологічних факторів на міцність при згині РПБ у віці 1 доба: а) РПБ із застосуванням золи виносу ТЕС; б) РПБ із застосуванням доменного гранульованого шлаку

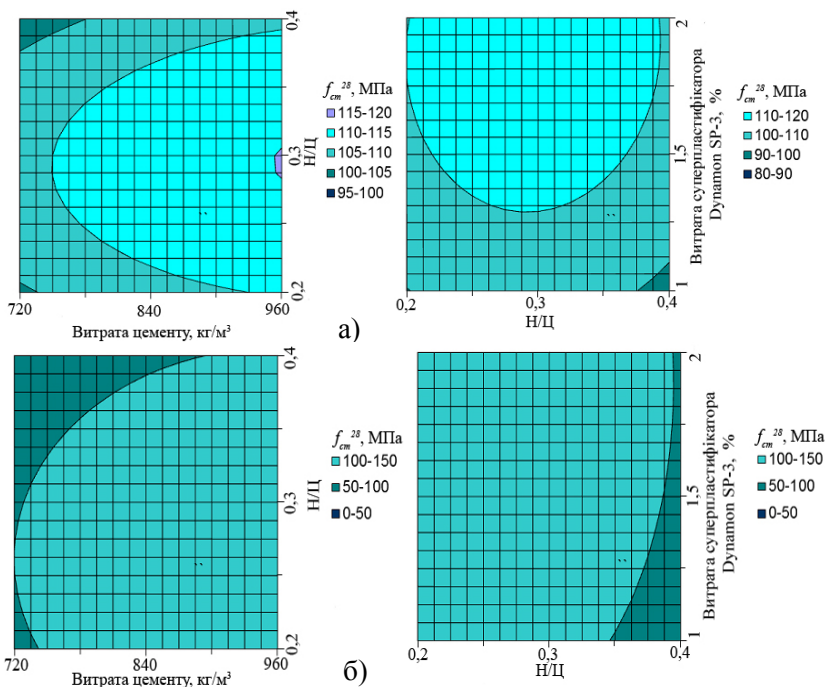




**Рис. 1.32.** Вплив технологічних факторів на міцність при стиску РПБ у віці 1 доба: а) РПБ із застосуванням золи виносу ТЕС; б) РПБ із застосуванням доменного гранульованого шлаку



**Рис. 1.33.** Вплив технологічних факторів на міцність при згині РПБ у віці 28 діб: а) РПБ із застосуванням золи виносу ТЕС; б) РПБ із застосуванням доменного гранульованого шлаку



**Рис. 1.34.** Вплив технологічних факторів на міцність при стиску РПБ у віці 28 діб: а) РПБ із застосуванням золи виносу ТЕС; б) РПБ із застосуванням доменного гранульованого шлаку

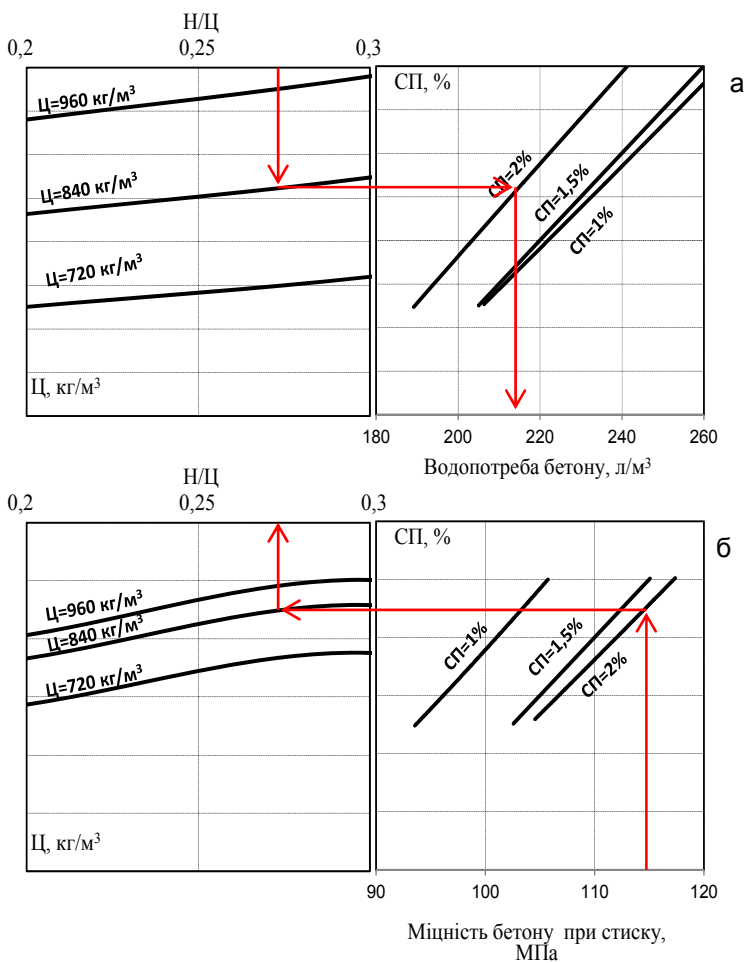
Характер впливу варійованих факторів на міцнісні характеристики РПБ, як випливає з аналізу комплексу отриманих експериментально-статистичних моделей та побудованих на їх основі графічних залежностей, суттєво не змінюється при збільшенні тривалості твердіння бетону. До збільшення міцності бетону як на стиск так і на розтяг при згині призводить збільшення витрати цементу та добавки суперпластифікатора Dynamon SP-3, що пов'язано із різким зниженням водоцементного відношення і відповідним збільшенням щільності зразків. Також до деякого зростання міцності призводить збільшення кількості активної мінеральної добавки в діапазоні від 20 до 30% від маси в'язучого. Подальше

збільшення її кількості призводить до різкого зниження міцності, яке викликане зменшенням кількості активної клінкерної складової у загальній масі в'язучого. Вплив даного фактору на міцнісні характеристики РПБ носить екстремальний характер.

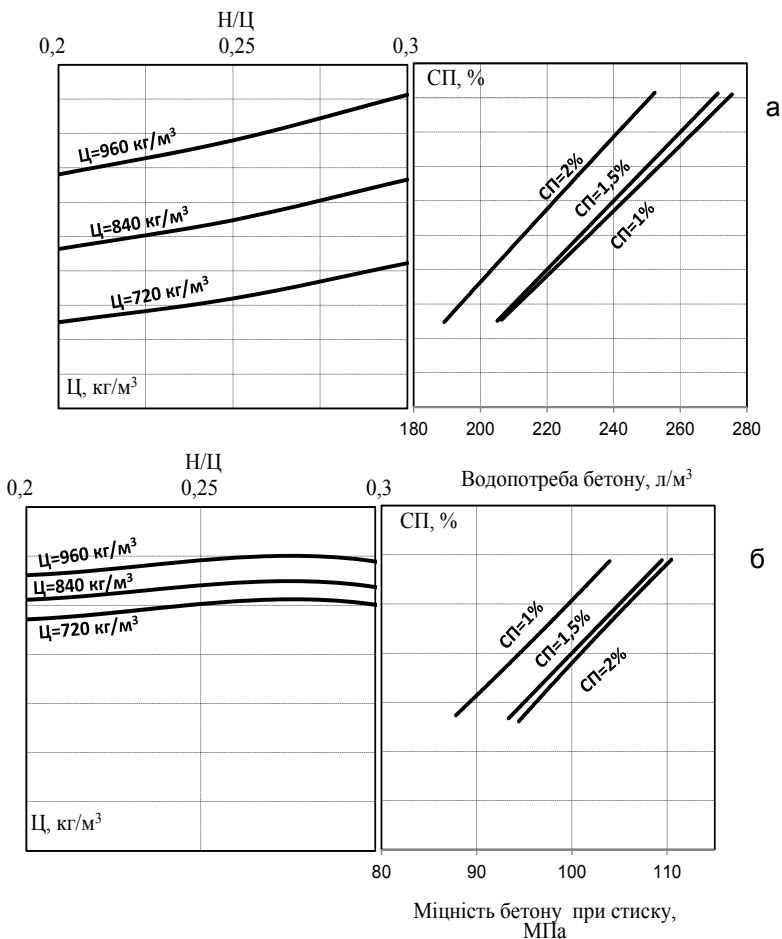
В результаті аналізу комплексу отриманих експериментальних даних було встановлено, що більш ефективною активною мінеральною добавкою (із двох досліджуваних) для виготовлення реакційно-порошкових бетонів є зола виносу ТЕС. Заміна доменного гранульованого шлаку золою виносу ТЕС при однаковій кількості добавки призводить в середньому до збільшення міцності зразків на 2...5%. При цьому максимальна міцність при стиску 115,2 МПа та при згині 24,1 МПа РПБ спостерігається при наступному співвідношенні варійованих факторів: витрата цементу на максимальному рівні – 960 кг/м<sup>3</sup>, співвідношення між кількістю золи виносу ТЕС та кількістю цементу на середньому рівні – 0,3; витрата суперпластифікатора Dynamon SP-3 на максимальному рівні – 2% від маси в'язучого.

На основі отриманих експериментально-статистичних моделей (1.38, 1.45, 1.46, 1.53) (табл. 1.15) побудовано номограми водопотреби та міцності реакційно-порошкових бетонів, виготовлених із застосуванням золи виносу ТЕС та доменного гранульованого шлаку. Дані номограми в сукупності з комплексом отриманих моделей (табл. 1.15), можуть бути використані для проектування складів РПБ із заданою міцністю та рухомістю. При цьому методика розрахунку полягає в наступному:

1. Використовуючи номограму міцності при стиску наведену на рис. 1.35 або 1.36, залежно від виду використаного наповнювача, почергово визначаємо витрату суперпластифікатора Dynamon SP-3, витрату цементу та вміст мінеральної добавки (наповнювача), які будуть забезпечувати задану міцність РПБ на стик у віці 28 діб.



**Рис. 1.35.** Номограма водопотреби (а) та міцності (б) при стиску РПБ виготовлених із використанням золи виносу ТЕС



**Рис. 1.36.** Номограма водо потреби (а) та міцності (б) при стиску РПБ виготовлених із використанням доменного гранульованого шлаку

2. Використовуючи номограму водопотреби наведену на рис. 1.35 або 1.36, при попередньо визначених витраті суперпластифікатора, цементу та мінеральної добавки, встановлюємо витрату води яка буде забезпечувати отримання

бетонної суміші з рухомістю 25...30 см по віскозиметру Сутгарда.

3. Витрату заповнювачів можна розрахувати, знаючи об'єм цементного тіста ( $V_{ц.м}$ ) в бетонній суміші.

Об'єм цементного тіста, л/м<sup>3</sup>:

$$V_{ц.м} = \frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{H}{\rho_{н}} + B. \quad (1.54)$$

Об'єм піску, л/м<sup>3</sup>:

$$V_n = 1000 - V_{ц.м}. \quad (1.55)$$

Маса піску  $П$ , кг/м<sup>3</sup> :

$$П = \rho_n V_n. \quad (1.56)$$

У наведених вище формулах  $\rho_{ц}$ ,  $\rho_{н}$ ,  $\rho_n$  – дійсна густина відповідно цементу ( $\rho_{ц} \approx 3,1$  кг/л), наповнювача та піску.

### **Приклад розрахунку**

Розрахувати склад РПБ, виготовленого із застосуванням в якості активного мінеральної добавки золи виносу ТЕС, з 28-добовою міцністю на стиск 115 МПа та рухомістю 25...30 см по віскозиметру Сутгарда. В якості пластифікуючої добавки використовується суперпластифікатор Dynamon SP-3. Дійсна густина цементу  $\rho_{ц}=3,1$  г/см<sup>3</sup>, золи виносу ТЕС  $\rho_{н}=2,8$  г/см<sup>3</sup>, піску  $\rho_n=2,65$  г/см<sup>3</sup>.

1. Використовуючи номограму міцності при стиску наведену на рис.1.35 б, встановлюємо, що для забезпечення заданої міцності при стиску 110 МПа мінімально можлива витрата цементу складатиме – 840 кг/м<sup>3</sup>, вміст мінеральної добавки – 27,5% від маси цементу, витрата суперпластифікатора Dynamon SP-3 – 2% від маси в'язучого.

2. Використовуючи номограму водопотреби, наведену на рис. 1.35 а, встановлюємо, що при розрахунковому компонентному складі бетону мінімально можлива кількість води, при якій забезпечується задана рухомість бетонної 25...30 см по віскозиметру Сутгарда буде складати – 215 л/м<sup>3</sup>.

3. Витрату заповнювачів розраховуємо, знаючи об'єм цементного тіста ( $V_{ц.т}$ ) в бетонній суміші.

Об'єм цементного тіста, л/м<sup>3</sup>:

$$V_{ц.т} = \frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{Н}{\rho_{н}} + В = \frac{840}{3,1} + \frac{231}{2,8} + 215 = 568,5 \text{ л/м}^3$$

Об'єм піску, л/м<sup>3</sup>:

$$V_n = 1000 - V_{ц.т} = 1000 - 568,5 = 431,5.$$

Маса піску  $П$ , кг/м<sup>3</sup> :

$$П = \rho_n V_n = 2,65 \cdot 431,5 = 1143 \text{ кг/м}^3$$

Отриманий за розрахунками бетон має наступний склад: цемент – 840 кг/м<sup>3</sup>, зола виносу – 231 кг/м<sup>3</sup>, вода – 215 л/м<sup>3</sup>, пісок фракції 0,16...1,25 – 1143 кг/м<sup>3</sup>. Витрата суперпластифікатора DYNAMON SP-3 складає 2% від маси в'язучого.

### **1.6.3. Вплив температурних режимів твердіння на міцність реакційно-порошкових бетонів**

Дослідженнями [4] встановлено, що на властивості РПБ суттєвий вплив має застосування додаткового тиску при формуванні, зміна температурних умов твердіння, а також спільне використання тиску та температури.

Показано [4], що застосування тиску приводить до: зменшення втягнутого повітря, видалення надлишку води і компенсування хімічної усадки. Подібні явища були відмічені і у роботі [82], де досліджували міцність при стиску, коли зразки піддавалися заданому навантаженню. Встановлено, що повітряні і водні порожнини, присутні в РПБ без додаткового тиску, при застосуванні заданого тиску суттєво знижуються. Як відомо суттєво збільшує міцність на стиск бетону його формування в сталевих трубах [86]. Такий спосіб також ефективний і для РПБ [87]. Встановлено, що твердіння РПБ в сталевих трубах значно підвищує його міцність на стиск, а також поздовжню деформацію.



Аналогічний результат був отриманий у роботі [75] – міцність при стиску, а також ударна в'язкість бетону значно покращилися з використанням обойми зі сталеві труби.

Встановлено [82], що термічна обробка РПБ після формування є досить ефективною з позиції прискорення пуцоланової реакції мікрокремнезему і кварцу, суттєво змінює мікроструктуру РПБ, а також позитивно впливає на процес видалення надлишкової води. Термічна обробка після тузавлення сприяє утворенню тобермориту ( $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$ ) при температурах до  $200^\circ\text{C}$ , і ксеноліту ( $\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$ ) при температурі  $250^\circ\text{C}$  і вище). Присутність ксеноліту в РПБ при  $250^\circ\text{C}$  було підтверджено в роботах [83] і [84]. У роботі [85] помічено, що підвищення температури прискорює процес гідратації в ранньому віці і підвищує міцність матеріалу на стиск. Однак швидкий процес гідратації призводить до швидкого наростання аутогенної усадки бетону у ранньому віці.

Була виконана серія досліджень з метою визначення впливу теплової обробки на процес твердіння і міцність РПБ з використанням золи-виносу та доменного шлаку. При виконанні всіх експериментальних досліджень склад РПБ не змінювався та був наступним: витрати цементу –  $840\text{ кг/м}^3$ , мінеральної добавки –  $360\text{ кг/м}^3$ , піску фракції  $0,16...1,25\text{ мм}$  –  $1200\text{ кг/м}^3$ , суперпластифікатора поліакрилатного типу Dynamon SP-3 – 2% від маси в'язучого. Витрати води визначалися із умови забезпеченості заданого розпливу  $25...30\text{ см}$  за віскозиметром Сутгарда. В якості мінеральних добавок на даному етапі досліджень було використано мелений кварцовий пісок (МКП), доменний гранульований шлак (ДГШ) та золу виносу ТЕС (ЗВ). Додатково до складу бетону вводились добавки метакаоліну в кількості 10% від маси цементу. Теплова обробка проводилась у лабораторній пропарювальній камері за наступним режимом: попереднє витримання – 2 год; підйом температури зі швидкістю  $25^\circ\text{C/год}$ ; ізотермічна витримка – 8 год, охолодження. Після ТВО визначали міцність зразків при стиску через 2 год, у віці 7 та 28 діб. Результати визначення міцності наведені у табл. 1.16 та на рис. 1.37.

Таблиця 1.16

Вплив пропарювання на міцнісні характеристики РПБ

№	Вид мінеральної добавки, кг/м³	В/Ц	Роз- плив, см	Міцність бетону у віці діб					
				$f_{c,tf}^{TBO}$ МПа	$f_{cm}^{TBO}$ МПа	$f_{c,tf}^7$ МПа	$f_{cm}^7$ МПа	$f_{c,tf}^{28}$ МПа	$f_{cm}^{28}$ МПа
Температура ізотермічної витримки 50° С									
1	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,29	30	13,89	45,1	19,44	86,8	19,62	111,0
2	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,29	30	14,64	51,2	22,45	93,7	24,14	115,6
3	Доменний гранульо- ваний шлак (ДГШ)	0,29	30	14,63	47,3	21,52	89,1	22,42	112,4
4	Мелений кварцовий пісок (МКП) +метакаолін (МТК)	0,29	30	15,38	67,6	20,94	87,6	22,32	120,3
5	Зола виносу ТЕС (ЗВ) +метакаолін (МТК)	0,29	30	17,38	72,4	24,40	99,2	26,47	127,6
6	Доменний гранульо- ваний шлак (ДГШ) +метакаолін (МТК)	0,29	30	16,71	71,4	22,37	94,4	23,74	126,8
Температура ізотермічної витримки 80° С									
1	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,29	30	14,46	67,1	22,21	88,3	22,53	114,7
2	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,29	30	19,90	79,7	24,07	96,1	25,39	120,0
3	Доменний гранульо- ваний шлак (ДГШ)	0,29	30	19,90	78,3	23,30	93,8	24,83	116,5
4	Мелений кварцовий пісок (МКП) +метакаолін (МТК)	0,29	30	20,83	74,0	22,80	94,9	23,43	124,2
5	Зола виносу ТЕС (ЗВ) +метакаолін (МТК)	0,29	30	26,15	92,6	27,23	105,3	28,48	132,6
6	Доменний гранульо- ваний шлак (ДГШ) + метакаолін (МТК)	0,29	30	24,43	92,6	24,53	99,1	26,20	128,6

Поряд з пропарюванням у роботах багатьох дослідників для забезпечення максимальної гідратації і пуцоланової реакції у РПБ застосовується твердіння у середовищі гарячої води [82]. Для визначення ефективності твердіння досліджуваних нами кладів РПБ здійснювалось витримування зразків у воді при температурі 50 та 80° С.

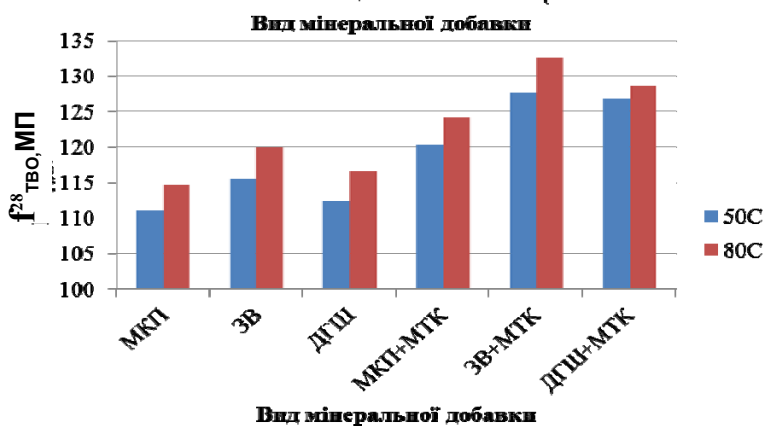
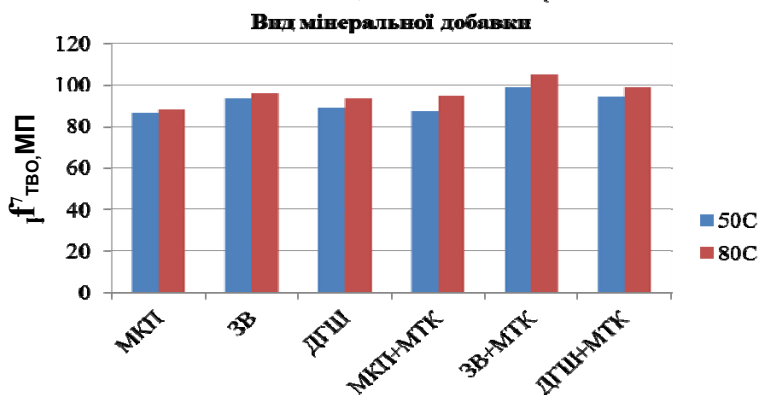
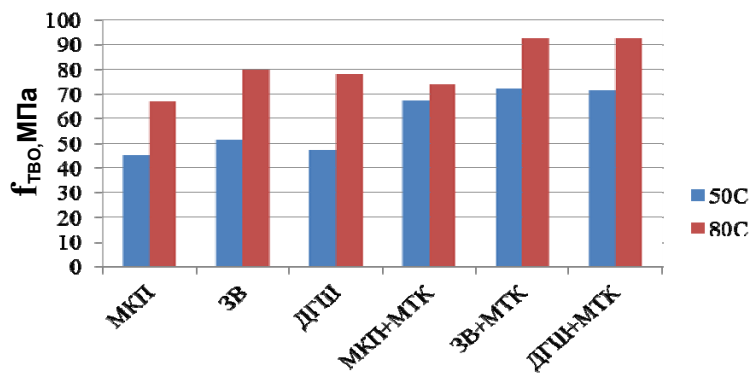
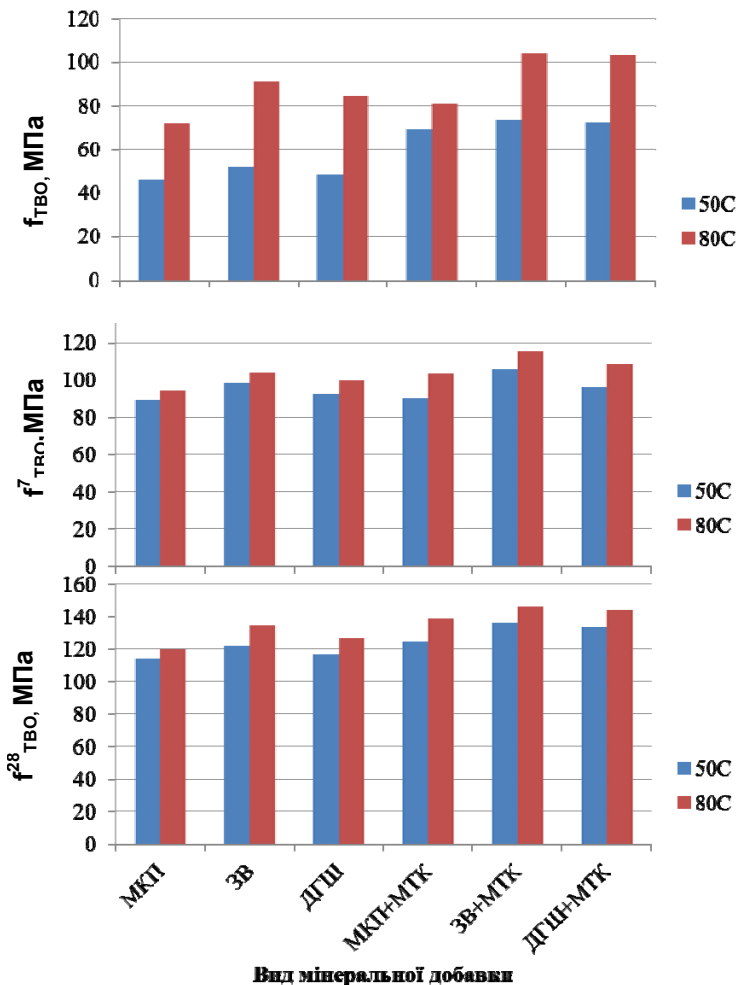


Рис. 1.37. Вплив виду мінеральних добавок та температури пропарювання на міцність РПБ

Результати визначення міцності РПБ, що тверднули у гарячій воді наведені у табл. 1.17 та на рис. 1.38.



**Вид мінеральної добавки**  
 Рис. 1.38. Вплив температури витримування у воді та виду мінеральних добавок на міцність РПБ

Пропарювання РПБ при температурі  $50^{\circ}\text{C}$  спричиняє підвищення міцності при стику на 1 добу в середньому у 2,5...3 р., на 28 добу – на 1,5...2%. Підвищення температури ізотермічного прогріву однозначно викликає підвищення міцності РПБ. Порівняно зі зразками, що тверділи у нормальних умовах, пропарювання при  $80^{\circ}\text{C}$  спричиняє підвищення міцності на 1 добу у 3,5...4 р., на 28 добу – на 4...5%. Як відомо [88], тепловолігсна обробка суттєво активізує пуцоланову активність різних мінеральних добавок. Отримані результати показують, що застосування пропарювання значно збільшує ефект підвищення міцності, що викликають добавки золи-виносу та доменного шлаку (рис. 1.37). Порівняно з цими добавками ефект меленого кварцового піску значно нижчий. У роботах [83; 84] відмічається, що позитивний вплив термічної обробки на ефективність меленого кварцу як мінеральної добавки, викликає утворення гідросилікатів кальцію, при температурі твердіння РПБ, яка перевищує  $250^{\circ}\text{C}$ . При температурах  $50...80^{\circ}\text{C}$  теплова обробка сприяє лише прискоренню процесів взаємодії гідрооксиду кальцію з аморфним кремнеземом золи та шлаку. Позитивний вплив пропарювання відображається також і на міцності при згині (табл. 1.17).

Таблиця 1.17

Вплив тепловологісної обробки в гарячій воді на міцнісні характеристики РПБ

№	Вид мінеральної добавки,кг/м <sup>3</sup>	В/Ц	Розп-лив, см	Міцність бетону у віці діб					
				$f_{ctf}^{180}$ , МПа	$f_{cm}^{180}$ , МПа	$f_{ctf}^7$ , МПа	$f_{cm}^7$ , МПа	$f_{ctf}^{28}$ , МПа	$f_{cm}^{28}$ , МПа
Температура ізотермічної витримки 50° С									
1	Мелений кварцовий пісок(МКП)	0,29	30	14,36	46,2	20,17	89,4	20,21	114,3
2	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,29	30	15,44	52,2	23,48	98,4	25,17	121,7
3	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,29	30	15,22	48,3	22,20	92,6	23,11	117,2
4	Мелений кварцовий пісок(МКП) + метаксаолін(МТК)	0,29	30	16,06	68,9	21,73	90,2	22,88	124,4
5	Зола виносу ТЕС+ метаксаолін(МТК)	0,29	30	18,42	73,6	25,85	106,2	27,66	135,8
6	Доменний гранульо-ваний шлак (ДГШ)+ метаксаолін (МТК)	0,29	30	17,56	72,7	23,46	96,3	24,66	133,6
Температура ізотермічної витримки 80° С									
1	Мелений кварцовий пісок(МКП)	0,29	30	15,14	71,7	24,56	94,4	25,53	119,6
2	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,29	30	21,64	91,0	26,92	103,9	27,21	134,4
3	Доменний гранульо-ваний шлак (ДГШ)	0,29	30	21,15	84,6	26,43	99,7	27,08	126,9
4	Мелений кварцовий пісок(МКП) + метаксаолін (МТК)	0,29	30	22,56	81,2	23,45	103,6	24,61	138,3
5	Зола виносу ТЕС+ метаксаолін(МТК)	0,29	30	28,91	103,9	29,09	115,7	30,82	145,9
6	Доменний гранульо-ваний шлак (ДГШ)+ метаксаолін (МТК)	0,29	30	26,27	103,0	26,75	108,8	28,17	143,9

Максимальні значення міцності РПБ при випробуванні зразків отримані при твердінні у воді з температурою 80° С (табл. 1.17 рис. 1.38). РПБ, що містив комплексну мінеральну добавку метакаолін 10% та золу-виносу (10%) на 28 добу твердіння досягнув міцності при стиску 145 МПа, при згині – 30,8 МПа, що на 15...17% вище ніж міцність бетону такого ж складу, що твердів при нормальних умовах.

#### 1.6.4. Зерновий склад піску як заповнювача реакційно-порошкових бетонів

Як показують теоретичні передумови та результати експериментальних досліджень різних авторів [4-6], значний вплив на реологічні та механічні властивості бетонів спричиняє зерновий склад заповнювача та співвідношення між окремими фракціями.

Ефективним експериментальним способом дослідження впливу співвідношення між різними фракціями заповнювача на властивості та оптимізації гранулометричного складу є використання методів математичного планування експерименту з реалізацією симплекс-решітчастих планів типу «склад-властивість» та «склад-технологія-властивість»[145]. Умови планування наведені у табл. 1.18.

Таблиця 1.18

Умови планування експерименту

Фактори		Рівні варіювання		
Натуральний вид	Кодований			
фактори «суміш»		0	1	
Вміст фракції (0,63...1,25 мм), %	V <sub>1</sub>	0	100	
Вміст фракції (0,315...0,63 мм), %	V <sub>2</sub>	0	100	
Вміст фракції (0,16...0,315 мм), %	V <sub>3</sub>	0	100	
«технологічні» фактори		-1	0	+1
Ступінь наповнення цементного тіста меленим піском, Н/(Н+Ц)	X <sub>1</sub>	0	0,15	0,3
Питома поверхня меленого піску, (S <sub>п</sub> , см <sup>2</sup> /г)	X <sub>2</sub>	2300	3500	4700

В дослідях використовувались пісок кар'єрний фракцій 0,16...0,315 мм, 0,315...0,63 мм, 0,63...1,25 мм, портландцемент ПЦ-I-500 та суперпластифікатор Melflux 2141 f. В якості

мікронаповнювача цементного тіста використовували мелений пісок з різною тонкістю помелу.

Згідно плану експерименту готувалась реакційно-порошкова бетонна суміш з рухомістю, що характеризувалась розпливом конуса  $250 \pm 5$  см. Склад бетону був прийнятий наступний: (витрата в'язучого В'яз (цемент+наповнювач))=1200 кг/м<sup>3</sup>; витрата заповнювача З=1200 кг/м<sup>3</sup>. Кількість суперпластифікатора в усіх точках експерименту приймалась однаковою – 1% від маси в'язучого. З бетонної суміші виготовлялись зразки-куби 10×10×10 см, які піддавали твердінню у нормальних умовах і випробовували у віці 28 діб з визначенням міцності при стиску.

Таблиця 1.19

Матриця планування та результати експерименту

№ з. п.	Кодовані значення факторів					Вихідні параметри		
	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$X_1$	$X_2$	В/В'яз	Міцність при стиску, МПа, $f_{28}$	$C_f$ , кг/МПа
1.	1	0	0	-1	-1	0,20	43,0	27,9
2.	1	0	0	+1	+1	0,20	40,0	18,0
3.	0	1	0	-1	-1	0,25	37,4	32,1
4.	0	1	0	+1	-1	0,23	61,9	11,6
5.	0	1	0	+1	+1	0,25	66,0	10,9
6.	0	1	0	-1	+1	0,23	61,4	19,5
7.	0	0	1	-1	-1	0,28	52,3	22,9
8.	0	0	1	+1	0	0,26	94,6	7,6
9.	0	1	1	-1	+1	0,27	80,8	14,9
10.	0,5	0,5	0	0	-1	0,25	84,8	11,3
11.	0,8	0,2	0	-1	+1	0,22	56,6	21,2
12.	0,3	0	0,7	+1	+1	0,30	92,8	7,8
13.	0,5	0	0,5	+1	-1	0,27	89,3	8,1
14.	0,6	0	0,4	0	0	0,25	104,5	9,2
15.	0	0,4	0,6	0	-1	0,30	100,6	9,5
16.	0	0,5	0,5	-1	0	0,31	91,3	13,1

В результаті експерименту отримані адекватні математичні моделі вихідних параметрів, наведені нижче:

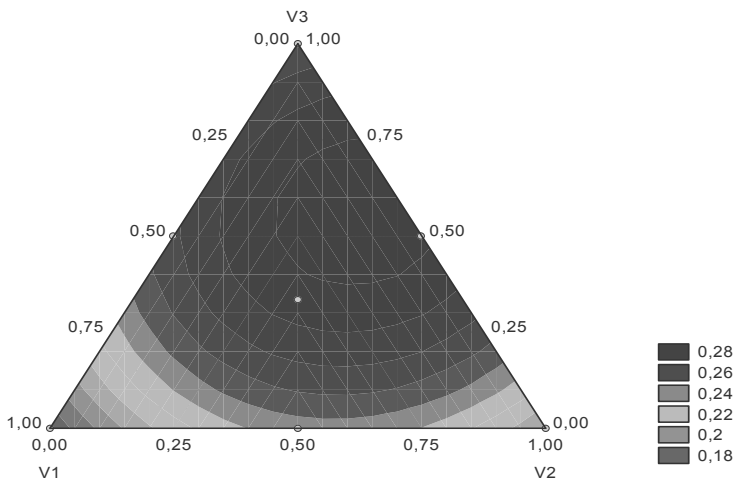


$$\begin{aligned}
B/B'_{\text{яж}} = & 0,17V_1 + 0,2V_2 + 0,25V_3 + \\
& + 0,2V_1V_2 + 0,19V_1V_3 + 0,23V_2V_3 - \\
& - 0,003V_1X_2 + 0,001V_2X_1 + 0,001V_2X_2 - \\
& - 0,003V_3X_1 + 0,012V_3X_2 + \\
& + 0,006X_1X_2 + 0,015X_1^2 + 0,007X_2^2
\end{aligned} \tag{1.57}$$

$$\begin{aligned}
f_{28} = & 73,5V_1 + 80,4V_2 + 103,3V_3 + \\
& + 65,6V_1V_2 + 80,1V_1V_3 + 96,3V_2V_3 + \\
& + 3,3V_1X_1 - 5,1V_1X_2 + 7,3V_2X_1 + \\
& + 7,0V_2X_2 + 9,1V_3X_1 + 10,7V_3X_2 - \\
& - 4,6X_1X_2 - 18X_1^2 - 9,5X_2^2
\end{aligned} \tag{1.58}$$

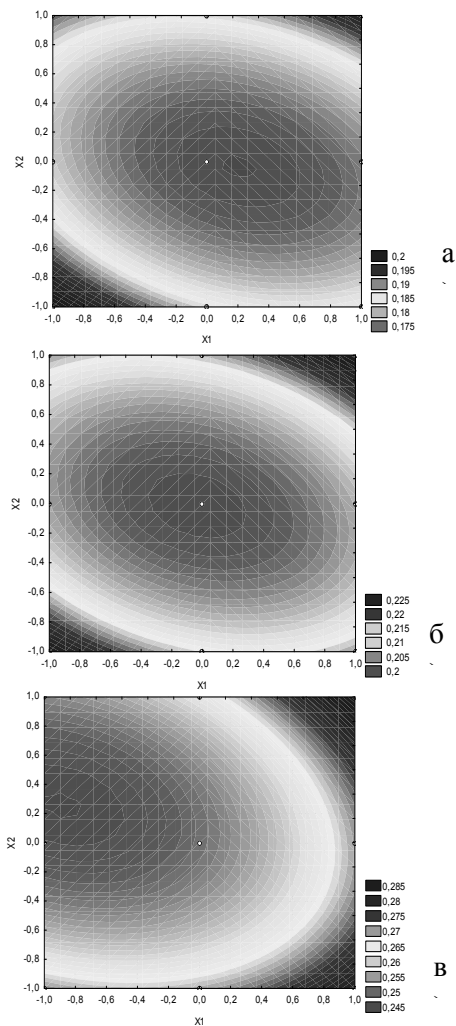
Як показує аналіз математичної моделі (1.57) водов'язуче відношення і, відповідно, водопотреба бетонної суміші для РПБ суттєво залежить від зернового складу та крупності зерен заповнювача (фактори  $V_1...V_3$ ). Також на водопотребу бетонної суміші значно впливає і наповнення цементного тіста меленим піском ( $X_1$  та  $X_2$ ).

Водов'язуче відношення реакційно-порошкової бетонної суміші знаходилося у межах 0,17...0,31. Зі збільшенням крупності зерен заповнювача витрата води, необхідна для забезпечення рухомості суміші, здебільшого знижувалась. При використанні фракції піску 0,63...1,25 мм задана рухомість забезпечувалась при  $B/B'_{\text{яж}}=0,18...0,19$ . При зниженні крупності до 0,315 мм,  $B/B'_{\text{яж}}$  підвищувалась до 0,2...0,22, а при зниженні крупності до 0,16...0,315 мм – до 0,25...0,27, здебільшого відповідно до питомої поверхні заповнювача. Вплив заповнювача найдрібнішої фракції менш помітний. Такий ефект здебільшого спостерігається при одночасній дії суперпластифікаторів з високою водоредукцією, наприклад на поліакрилатній чи полікарбоксилатній основі [79]. Зі збільшенням кількості меленого кварцового піску у наповненому цементному тісті та його питомої поверхні позитивна розріджуюча дія фракції 0,16...0,315 мм знижується.



**Рис. 1.39.** Діаграма впливу зернового складу заповнювача на водопотребу (В/В'яж) РПБ

Такий вплив дисперсної фракції у «тонкозернистій» бетонній суміші підтверджується даними отриманими у попередньому розділі щодо впливу дисперсних наповнювачів на властивості цементного тіста. Вплив факторів  $X_1$  та  $X_2$  (ступеня наповнення цементного тіста та дисперсності наповнювача) має екстремальний характер, тобто позитивний вплив цих факторів на легкоукладальність бетонної суміші спостерігається до деяких порогових значень, після досягнення яких водопотреба суміші починає зростати і уже не компенсується розріджуючою дією суперпластифікатора. Оптимальні, з позиції мінімальної водопотреби, значення ступеня наповнення цементного тіста меленим піском знаходяться в межах 0,08...0,2, значення питомої поверхні меленого піску – 2300...3600  $\text{см}^2/\text{г}$ . (табл.1.20).



**Рис. 1.40.** Діаграми впливу ступеня наповнення цементного тіста мінеральним наповнювачем кварцовим піском ( $X_1$ ) та його дисперсності ( $X_2$ ) на водопотребу РПБ: а) крупність заповнювача 0,63...1,25 мм; б) 0,315...0,63 мм; в) 0,16...0,315 мм

Таблиця 1.20

Оптимальні параметри дисперсного наповнювача (меленого піску) щодо досягнення мінімальної водопотреби реакційно-порошкової бетонної суміші

№	Фракція заповнювача	Ступінь наповнення цементного тіста	Питома поверхня меленого піску, $\text{см}^2/\text{г}$
1	0,63...1,25 мм	0,08...0,2	3000...3600
2	0,315...0,63 мм	0,1...0,17	3200...3600
3	0,16... 0,315 мм	0,17...0,2	2300...2400

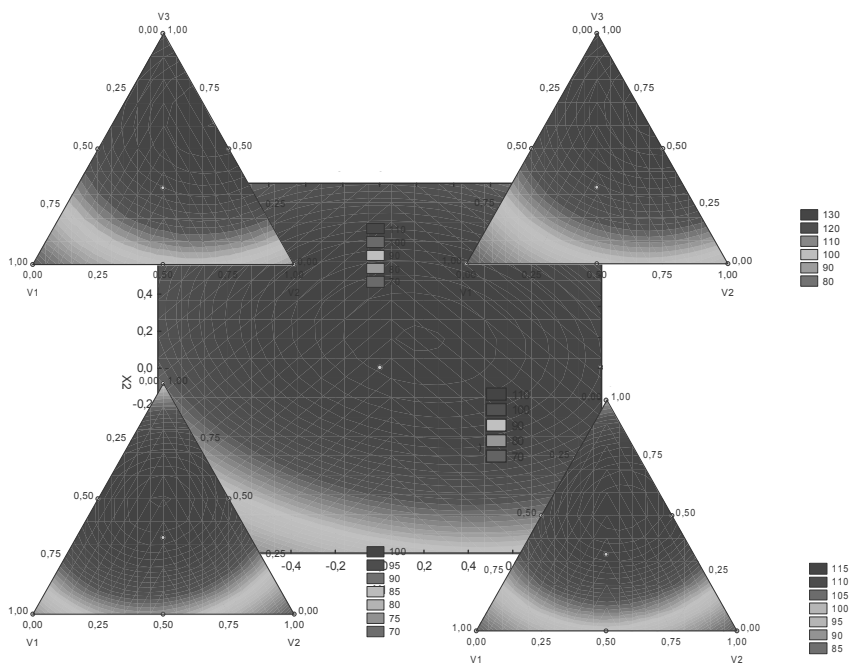
Міцність РПБ на 28-му добу за отриманими експериментальними даними змінювалась в досить широкому діапазоні у межах від 40 до 105 МПа. Це свідчить про значний ефект, який чинять вибрані для досліджень фактори на міцність РПБ.

Аналізуючи математичну модель міцності (1.58) слід відмітити, що фактори суміші ( $V_1...V_3$ ) чинять значний вплив на міцність бетону, причому як окремо, так і у поєднанні один з одним. Для усіх сумішевих факторів характерні також значні взаємодії з технологічними факторами. Для технологічних факторів ( $X_1, X_2$ ) помітні суттєві від'ємні квадратичні ефекти у рівнянні регресії (1.58), що свідчить про екстремальний характер впливу даних факторів на міцність РПБ.

За математичною моделлю (1.58) максимальні значення міцності (105...110 МПа) спостерігаються у випадках, коли заповнювач представлений крупною фракцією (0,63...1,25 мм), а також сумішами цієї фракції з іншими ((0,63...1,25 мм+0,16...0,315 мм) та (0,63...1,25 мм+0,315...0,63 мм), коли за рахунок змішування фракцій досягається мінімальна пустотність заповнювача [6]. Максимально ефективна з позиції міцності РПБ суміш двох фракцій – 0,63...1,25 мм та 0,16...0,315 мм. Найбільше зниження міцності викликається максимальним зниженням крупності заповнювача (до 0,16...0,315 мм) і, відповідно, підвищенням водопотреби суміші.

Суттєвій зміні міцності сприяє наповнення цементу дисперсною мінеральною добавкою, в якості якої був використаний мелений кварцовий пісок. Як уже відмічалось,

порошкова бетонна суміш на ненаповненому в'язучому важко перемішувалась, не мала необхідної текучості, що ускладнювало її укладання. Внаслідок цього експериментальні зразки без наповнювача відрізнялись неоднорідністю, підвищеним повітря втягуванням і, як наслідок, зниженою густиною. Максимальні значення міцності на такому в'язучому становили 90...92 МПа, при наступному співвідношенні фракцій: 0,16...0,315 мм – 25...40%; 0,315...0,63 мм – 30...40%; 0,63...1,25 мм – 40...70%. У даному випадку фракція 0,16...0,315 мм у деякій мірі бере на себе функцію дисперсного наповнювача цементного тіста, структуруючи бетонну суміш і полегшуючи вкладання та ущільнення.



**Рис. 1.41.** Комплексна ізопараметрична діаграма впливу зернового складу заповнювача, вмісту та дисперсності наповнювача на міцність РПБ у віці 28 діб

Як показує аналіз моделі (1.58) певний ступінь наповнення цементного тіста меленим кварцовим піском ( $X_1$ ) та питома поверхня меленого піску ( $X_2$ ), за рахунок покращення текучості суміші та ущільнення бетону, а також структуроутворюючої дії на цементну матрицю, відміченої багатьма авторами [79; 140], викликають підвищення міцності РПБ від 90...92 МПа до 110...120 МПа. Від'ємний ефект взаємодії даних факторів вказує на зниження ефективного вмісту кварцового наповнювача з підвищенням його дисперсності. Це можна пояснити значним підвищенням водопотреби та пористості цементної матриці. Такий висновок підтверджує також те, що взаємодія даних факторів стає більш помітною, коли заповнювач представлений дрібною фракцією піску (0,16...0,315 мм): максимальна у даному випадку міцність (70...72 МПа) досягається при мінімальній дисперсності кварцового наповнювача (2300...2700  $\text{см}^2/\text{г}$ ).

Максимальні значення міцності РПБ (110...120 МПа) можуть бути отримані при витраті меленого піску 180...200  $\text{кг}/\text{м}^3$  з питомою поверхнею 3500...4000  $\text{см}^2/\text{г}$ . Оптимальний гранулометричний склад заповнювача, що забезпечує дану міцність наступний: 0,16...0,315 мм – 0...5%; 0,315...0,63 мм – 30...35%; 0,63...1,25 мм – 60...65%.

З метою виконання оптимізації гранулометричного складу заповнювача, вмісту та дисперсності наповнювача у РПБ було розраховано показник, що характеризує питому витрату цементу на одиницю міцності. Даний показник був запропонований Ю.М. Баженовим та В. Калашниковим [141] для визначення ефективних складів реакційно-порошкових бетонів:

$$Ц_f = Ц / f_c, \text{кг} / \text{МПа}. \quad (1.59)$$

Аналізуючи розрахункові дані  $Ц_f$  слід звернути увагу на те, що мінімальні значення цього показника при оптимальному, з позиції досягнення максимальної міцності, співвідношенні фракцій заповнювача РПБ практично співпадають. Максимально ефективні значення міцності РПБ становлять 105...110 МПа при максимальних витратах меленого наповнювача та питомій поверхні (2000...2200  $\text{см}^2/\text{г}$ ).

Підвищення тонкості помелу піску та підвищення витрати цементу хоч і дають можливість підвищити міцність до 125 МПа, однак є малоефективним чинниками з економічної точки зору. Мінімально досягнуті значення показника  $C_f$  за результатами даного експерименту знаходяться в межах 7...8 кг/МПа. Як показано в роботах [79; 141], ефективні значення даного показника для РПБ становлять 4...5 кг/МПа, що дає можливість зробити висновок про необхідність використання при отриманні РПБ більш ефективних мінеральних добавок ніж використаний мелений кварцовий пісок.

## Висновки до розділу I (п. 1-5)

1. Для забезпечення високої міцності важливим є досягнення оптимального значення водо-в'язучого відношення. При В/В нижче за оптимальне цементний камінь РПБ має підвищену кількість повітряних порожнеч, викликану недущільненням, а також не повним проходженням реакції між мікрокремнеземом та гідроксидом кальцію. При В/Вяз вищому за оптимальне при інтенсивному перемішуванні бетонної суміші створюються умови для захоплення повітря, що у свою чергу також викликає підвищення пористості цементного каменю. Оптимальне значення В/Вяз, при якому досягнуті максимальні значення міцності становлять 0,2...0,22.

2. На досягнення максимальної текучості бетонної суміші та міцнісних характеристик РПБ суттєвий вплив також має вид та вміст добавки-суперпластифікатора. З досліджених найбільш ефективним видом добавки для РПБ можна вважати суперпластифікатор поліакрилатного типу Mapei Dynamon SP-3, який забезпечує максимальну міцність та кінетику її набору при витраті 2% від маси цементу. Збільшення вмісту добавки викликало незначний вплив на реологію суміші, а також на максимальну міцність РПБ при стиску (у 28 та 90 діб).

3. Було досліджено вплив різних видів мінеральних добавок (високоактивних (мікрокремнезем, метакаолін, цеоліт), малоактивних (зола-виносу, доменний шлак), неактивних (мелений пісок, аспіраційний гранітний пил) та їх комплексів на міцність РПБ при стиску, при згині та кінетику її набору. Встановлено, що часткова чи повна заміна мікрокремнезему іншими мінеральними добавками дає можливість отримати бетон зі значеннями міцності, що знаходяться у діапазоні 104...160 МПа.

4. Для РПБ з використанням метакаоліну в кількості  $120 \text{ кг/м}^3$ , характерні значення міцності при стиску у межах 130...133 МПа. Максимальною швидкістю твердіння відрізнялись серії, що містили мікрокремнезем та метакаолін. На першу добу такі композиції досягли міцності в межах від 40 до 48 МПа, що можна вважати достатнім для швидкісного



зведення споруд. Найбільш повільно тверділи композиції, із золою-виносу та шлаком.

5. Повна заміна мікрокремнезему ( $360 \text{ кг/м}^3$ ) дає змогу отримати РПБ з максимальною міцністю при стиску після 28 діб нормального твердіння 114,5 МПа у випадку використання золи-виносу, 118 МПа – при використанні доменного шлаку. Враховуючи їх ринкову вартість, використання даних мінеральних добавок, а також добавки меленого піску може бути найбільш виправдане з економічної точки зору.

6. Для РПБ з використанням золи-виносу та доменного шлаку отримано комплекс математичних моделей, котрі характеризують зв'язок основних властивостей бетонних сумішей та бетону з параметрами складу композицій. На основі даних залежностей розроблено методологію проектування складу РПБ, що містять золу-виносу та шлак.

7. Отримані РПБ характеризувались досить високими значеннями міцності при згині, котра теж суттєво залежить від виду мінеральної добавки – для композицій з мікрокремнеземом – 29...32 МПа, з метакаоліном та меленим піском – 26...27 МПа, зі шлаком та золою – 23...25 МПа.

8. Для отриманих РПБ характерне підвищене значення співвідношення міцності при стиску до міцності при згині ( $f_{cm}/f_{c,tf}$ ) – 4,0...5,0. Даний показник характеризує підвищену тріщиностійкість і деформативність матеріалу, тому є визначальною властивістю, котра дозволяє рекомендувати бетони такого типу для конструкцій, що працюють в умовах підвищених динамічних і ударних навантажень, характерних для захисних та фортифікаційних споруд.

9. Встановлено, що найбільш ефективною комплексною мінеральною добавкою, що дозволяє отримати РПБ без мікрокремнезему є поєднання метакаоліну з золою-виносу. Міцність при стиску такої композиції в умовах нормального твердіння становить – 124...126 МПа, а після витримання у воді при температурі  $80^\circ \text{C}$  – досягає 145 МПа. Синергетичний ефект даного комплексу пояснюється позитивним впливом кульовидних частинок золи-виносу на рухомість бетонних сумішей, що деякою мірою компенсує підвищення в'язкості, властиве метакаоліну.

10. Оптимальний гранулометричний склад заповнювача, що забезпечує максимальну міцність наступний: 0,16...0,315 мм – 0...5%; 0,315...0,63 мм – 30...35%; 0,63...1,25 мм – 60...65%. В цьому випадку забезпечується максимальна текучість та ущільнення бетонної суміші.

11. Найбільш ефективними видами теплової обробки досліджуваних складів РПБ виявились пропарювання, а також витримування у гарячій воді при температурі 80° С протягом 2-ої доби твердіння. Підвищення міцності у межах 15...17% порівняно з нормальним твердінням характерне для композитів, що містять золу-виносу та доменний шлак.

## ЛІТЕРАТУРА ДО РОЗДІЛУ I

1. Kwan, A.H.K. (2003), Development of High Performance Concrete for Hong Kong, *Materials Science and Technology in Engineering Conference - Now, New and Next*, website available at URL: [http://www.hkpc.org/hkiemat/mastec03\\_notes/03.pdf](http://www.hkpc.org/hkiemat/mastec03_notes/03.pdf) (дата звернення: 20.05.2020).
2. Aarsleff, L., Bredal-Joregensen, J. and Poulsen, E. (1985), On the properties of ultra high strength concrete with particular reference to heat of hydration, *Very High Strength Cement-Based Materials, Materials Research Society Symposia Proceedings*, Vol. 42, pp. 19–29.
3. Baache, H. H. (1981), Superplasticizers in Concrete, *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium in Denmark*.
4. Richard, P. and Cheyrezy, M. (1995), Composition of reactive powder concretes, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 7, pp. 1501–1511.
5. Cyr, M.F. and Shah, S.P. (2002), Advances in concrete technology, *Advances in Building Technology*, Vol. 1, pp. 17–27.
6. Shannag, M. J. (2000), High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 22, pp. 399–406.
7. Wong, K. Y. (1996), Development of high strength concrete for Hong Kong and investigation of their mechanical propertie, M. Phil. Thesis of the University of Hong Kong.
8. Collepardi, M., Collepardi, S., Troli, R. and Coppola, L. (2003), Innovative Concretes (SCC, HPC and RPC) in the Field of Architectural, Civil and Environmental Engineering, *Proceedings of the Sixth CANMET / ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology Proceedings*.
9. Cyr, M. F. and Shah, S. P. (2002), Advances in concrete technolog”, *Advances in Building Technology*, Vol. 1, pp. 17–27.
10. Ma, J. X. and Schneider, H. (2002), Properties of Ultra-High-Performance Concret”, *LACER*, Vol. 7, pp. 25–32.
11. Young, J. F. (1991), Macro-Defect-Free Cement: A Review, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 179, pp. 101–121.
12. Birchall, J. D. (1983), *Phil. Trans. R. Soc. Lond*, A310, pp. 31–42.

13. Cwirzen, A., Penttala, V. and Vornanen, C. (2008), Reactive powder based concretes: Mechanical properties, durability and hybrid use with OPC, *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, pp. 1217–1226.
14. Shaheen, E. and Shrive, N.G. (2006), Optimization of Mechanical Properties and Durability of Reactive Powder Concrete, *ACI Materials Journal*, No. 6, Vol. 103, pp. 444–451.
15. Richard, P. and Cheyrezy, M.H. (1994), Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength, *SCI SP* 144, pp. 507–518.
16. Rebertrost, M. and Cavill, B. (2006), Reactive Powder Concrete Bridge, *AustRoads Conference*, pp. 1–11.
17. Blais, P. Y. and Couture, M. (1999), Precast, Prestressed Pedestrian Bridge — World's First Reactive Powder Concrete Structure, *PCI Journal*, pp. 60–71.
18. Dauriac, C. (1997), Special concrete may give steel stiff competition, *The Seattle Daily Journal of Commerce*, website available at URL: <http://www.djc.com/special/concrete97/10024304.html> (дата звернення: 20.05.2020).
19. Lee, N.P. and Chisholm, D.H. (2005), Study Report Reactive Powder Concrete, *BRANZ*, Vol. 146, pp. 1–29.
20. Dowd, W. (1999), Reactive Powder Concrete – Ultra-High Performance Cement Based composite, *NOVA award nomination, Construction Innovation Forum*, website available at URL: [http://www.cif.org/nominations/nom\\_319.html](http://www.cif.org/nominations/nom_319.html) (дата звернення: 20.05.2020).
21. Ji, W. Y., An, M. Z., Yan, G. P. and Wang, J. M. (2004), Study on Reactive Powder Concrete used in the Sidewalk System of the Qinghai-Tibet Railway Bridge, *Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Beijing.
22. Yazici, H., Yardimci, M. Y., Aydin, S. and Karabulut, A. S. (2009), Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regime, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 1223 (дата звернення: 20.05.2020).1231.
23. Bresson, J. (1996), Mixing and Compacting Techniques for the Production of Very High Performance Precast Concrete Products,

*Proceedings of the 4<sup>th</sup> Interbational Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete*, Paris, France, pp. 269–272.

**24.** Jungwirth, J. (2005), Structural Behaviour of Tension Members Constructed of Ultra-high Performance Fibre Reinforced Concrete, PhD Thesis, Structural Concrete Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland.

**25.** Sadrekarimi, A. (2004), Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 2, No. 3, pp. 409–417.

**26.** Liu, C.T. and Huang, J.S. (2008), Highly flowable reactive powder mortar as a repair material, *Construction and Building Materials*, No. 6, Vol. 22, pp. 1043–1050.

**27.** Mangat, P. S. and O’Flaherty, F. (1999), Long Term Performance Criteria for Concrete Repair Materials, Concrete Durability and Repair Technology, *Thomas Telford Limited*, London, pp. 381–393.

**28.** Lee, M. G., Wang, Y. C. and Chiu, C. T. (2007), A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material, *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 182–189.

**29.** Matte, V., Moranville, M., Adenot, F., Richet, C. and Torrenti, J.M. (2000), Simulated microstructure and transport properties of ultra-high performance cement-based materials, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 1947–1954.

**30.** Collepardi, M., Collepardi, S., Troli, R. and Coppola, L. (2003), Innovative Concretes (SCC, HPC and RPC) in the Field of Architectural, Civil and Environmental Engineering, *Proceedings of the Sixth CANMET / ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology Proceedings*.

**31.** Coppola, L., Troli, R., Cerulli, T. and Collepardi, M., The influence of materials on the performance of Reactive Powder Concrete, website available at URL: [www.encosrl.it/enco%20srl%20ITA/ servizi/pdf/high/12v.pdf](http://www.encosrl.it/enco%20srl%20ITA/ servizi/pdf/high/12v.pdf). (дата звернення: 20.05.2020).

**32.** Fojtík, T. and Hubáček, A. (2006), Resistance of High Performance Concrete (Reactive Powder Concrete - RPC) to the Effects of a Corrosive Environment, *Centre for Integrated Design of Advanced Structures*.

33. Washer, G., Fuchs, P., Graybeal, B. A. and Hartmann, J. L. (2004), Ultrasonic Testing of Reactive Powder Concrete. *IEEE Transactions on ultrasonic, ferroelectrics and frequency control*, Vol. 51, No. 2, pp. 193–201.
34. Saad, M., Abo-El-Enein, S. A., Hanna, G. B. and Kotkata, M. F. (1996), Effect of silica fume on the phase composition and microstructure of thermally treated concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, pp. 1479–1484.
35. Flaga, K. (2000), Advances in materials applied in civil engineering, *Journals of Materials Processing Technology*, Vol. 106, pp. 173–183.
36. Scrivener, K. L. and Kirkpatrick, R. J. (2008), Innovation in use and research on cementitious material, *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, pp.128–136.
37. ACI committee 363 (1994), Guide for the use of silica fume in concrete, *Detroit: American Concrete Institute*.
38. Kronlof, A. (1994), Effect of very fine aggregate on concrete strength, *Materials and Structures*, Vol. 27, pp. 185–194.
39. Appa Rao, G. (2003), Investigations on the performance of silica fume-incorporated cement pastes and mortars, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 1765–1770.
40. Papadakis, V. (1999), Experimental Investigation and theoretical Modelling of Silica Fume Activity in Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 79–86.
41. Reschke, T. (2000), “Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefü-geentwicklung und die Festigkeit von Beton”, *Schriftenreihe der Zementindustrie*, Heft 62.
42. Zanni, H., Cheyrezy, M., Maret, V., Philippot, S. and Nieto, P. (1996), “Investigation of hydration and pozzolanic reaction in Reactive Powder Concrete (RPC) using  $^{29}\text{Si}$  NMR”, *Cement and Concrete Research*, No. 1, Vol. 26, pp. 93–100.
43. Aitcin, P.C. (1992), “The Use of Superplasticizers in High Performance Concrete”, *High Performance Concrete – from Material to Structure*, E&FN Spon, pp. 14–33.
44. Weibe, D. and Orgass, M. (2004), “Ultra High Strength Concrete”, *the 3<sup>rd</sup> Leipzig Conference of Innovations in Construction*, LACER, No. 9

45. Huang, Z. and Shen, P. (1993), "Experimental study on 200 MPa ultra-high steel fiber concrete", *Concrete*, Vol. 3, pp. 3–7 (Chinese).
46. Hannant, D. J., Huges, D. C. and Kelly, A. (1983), "Technology in the 1990s: Developments in Hydraulic Cements", *The Royal Society*, London, pp. 175.
47. Majumdar, A. J. and Laws, V. (1983), "Technology in the 1990s: Developments in Hydraulic Cements", *The Royal Society*, London, pp. 191.
48. Vernet, C. P. (2004), "Ultra-durable concretes: structure at the micro- and nanoscale", *MRS Bull.*, No. 5, Vol. 29, pp. 324–327.
49. Wong H.H.C. and Kwan A.K.H. (2005), "Packing Density: A Key Concept for Mix Design of High Performance Concrete", website available at URL: [http://www.hkpc.org/hkiemat/mastec05\\_program\\_notes/Prof.%20Albert%20 KWAN.pdf](http://www.hkpc.org/hkiemat/mastec05_program_notes/Prof.%20Albert%20 KWAN.pdf) (дата звернення: 20.05.2020).
50. Cheyreyzy, M., Maret, V. and Frouin, L. (1995), "Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete)", *Cement and Concrete Research*, No. 7, Vol. 25, pp. 1491–1500.
51. Banfill, P.F.G. (1981), "A viscometric study of cement pastes containing superplasticizers with a note on experimental techniques", *Magazine of Concrete Research*, No.114, Vol. 33, pp. 37–47.
52. Behnood, A. and Ziari, H. (2008), "Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 30, pp. 106–112.
53. Lahlou, K., Aitcin, P.-C. and Chaallal, O. (1992), "Behaviour of High Strength Concrete Under Confined Stresses", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 14, pp. 185–193.
54. Behnood, A. and Ziari, H. (2008), "Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 30, pp. 106–112.
55. Jennings H. M. (2000), "A Model for the Microstructure of Calcium Silicate Hydrate in Cement Paste", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 101–116.
56. Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M. (1993), "Concrete structure, properties and materials", (Second edition), Prentice Hall, New Jersey.
57. Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J., and Aitcin,

P.C. (1997), “Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes”, *ACI Materials Journal*, Vol. 94, No. 4, pp. 286–290.

**58.** Banthia, N., Biparva, A. and Mindess, S. (2005), “Permeability of concrete under stress”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 9, pp. 1651–1655.

**59.** Charron, J-P., Denarié, E. and Brühwiler, E. (2008), “Transport properties of water and glycol in an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under high tensile deformation”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, pp. 689–698.

**60.** Haque, M.N. (1996), “Strength Development and Drying Shrinkage of High Strength Concretes”, *Cement and Concrete Composites*, No. 5, Vol. 18, pp. 333–342.

**61.** Wong, A.C.L., Childs, P. A., Berndt, R., Macken, T., Peng, G. D. and Gowripalan, N. (2007), “Simultaneous measurement of shrinkage and temperature of reactive powder concrete at early-age using fibre Bragg grating sensors”, *Cement and Concrete Composites*, No. 7, Vol. 29, pp. 490–497.

**62.** Aitcin, P.C. (1999), “Autogenous Shrinkage Measurement”, *Autogenous Shrinkage of Concrete*, edited by Eiichi Tazawa, London, UK, pp. 257–267.

**63.** Zhang, M.H., Tam, C.T. and Leow, M.P. (2003), “Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 1687–1694.

**64.** Tazawa, E. and Miyazawa, S. (1993), “Autogenous shrinkage of concrete and its importance in concrete technology”, *Creep and Shrinkage of Concrete, Proceedings of the 5th International RILEM Symposium*, E & FN Spon, London, pp. 159–168.

**65.** Brooks, J. J., Cabrera, J. G. and Megat Johari, M. A. (1998), “Factors affecting the autogenous shrinkage of silica fume high-strength concrete”, *Proceedings of International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete*, Hiroshima, Japan, E & FN Spon, pp. 195–201.

**66.** Mak, S. L., Ritchie, D., Taylor, A. and Diggins, R. (1998), “Temperature effects on early age autogenous shrinkage in high performance concretes”, *Proceedings of International Workshop on*



*Autogenous Shrinkage of Concrete*, Hiroshima, Japan, E & FN Spon, pp. 155–165.

67. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Основы бетоноведения. СПб. : Стройбетон, 2006. 691 с.

68. Ravindrarajah, R. S., Mercer, C. M. and Toth, J. (1994), *Proceedings of ACI International Conference on High Performance Concrete (ACI SP-149)*, Singapore, pp. 475.

69. Liu, C. T. and Huang, J. S. (2009), “Fire performance of highly flowable reactive powder concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 2072–2079.

70. Юнг В. Н. Основы технологии в’язучих веществ. М. : Промстройиздат, 1951. 355 с.

71. Пантелеев А. С. Цементы с микронаполнителями : сб. тр. ВХО им. Д. И. Менделеева. № 6. Т. VI. С. 362–367.

72. Усов Б. А. Сухие строительные смеси на основе молотого портландцемента с кварцосодержащими микронаполнителями. *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI*. 2003. № 7. С. 14–15.

73. Венюа М. Цементы и бетоны в строительстве. М. : Стройиздат, 1980. 415 с.

74. Лещинский М. Ю. О применении золы-уноса в бетонах. *Бетон и железобетон*. 1987. № 1. С. 19–21.

75. Баженов П. И. Технология автоклавных материалов. Л. : Стройиздат, 1978. 378 с.

76. Дворкин Л. И., Соломатов В. И., Выровой В. Н. Цементные бетоны с минеральными наполнителями / под ред. Дворкина Л. И. Киев : Будивэлник, 1991. 136 с.

77. Пантелеев А. С., Колбасов В. Н. Цементы с минеральными добавками. *Новое в химии и технологии бетона*. М. : Стройиздат, 1971. С. 155–164.

78. Будников П. П., Колбасов И. М., Пантелеев А. С. О гидратации алюмосодержащих минералов портландцемента в присутствии карбонатных микронаполнителей. *Цемент*. 1961. № 1. С. 13–16.

79. Баженов Ю. М., Демьянова В. С., Калашников В. И. Модифицированные высококачественные бетоны. М. : Ассоциация строительных вузов, 2006. 368 с. ISBN 5-93093-422-

3.

**80.** Басин В. Е. Адгезионная прочность. М. : Химия, 1981. 208 с.

**81.** Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Строительные минеральные вяжущие материалы. М. : Инфра-Инженерия, 2011. 544 с.

**82.** Массачца Ф. Химия пуццолановых добавок и смешанных цементов. *Труды шостого міжнародного конгреса по химии цементу*. М. : Стройиздат, 1976. Т. 3. С. 209–221.

**83.** О механизме влияния тонкомолотых добавок на свойства цементного камня / Ф. Д. Овчаренко, В. И. Соломатов, В. М. Казанский и др. Докл. ; АН СССР. № 2. 1985. Т. 284. С. 318–403.

**84.** Физико-химическая механика дисперсных структур / под ред. П. А. Ребиндера. М. : Наука, 1966. 400 с.

**85.** Сергеев А. М. Использование в строительстве отходов энергетической промышленности. К. : Будівельник, 1984. 120 с.

**86.** Каприелов С. С. Научные основы модифицирования бетонов ультрадисперсными материалами : дис. д-ра техн. наук. М., 1995. 41 с.

**87.** Дворкин Л. И., Дворкин О. Л., Корнейчук Ю. А. Эффективные цементно-золевые бетоны. Ровно, 1998. 195 с.

**88.** Дворкин Л. И. Эффект активных наполнителей в пластифицированных цементных бетонах. *Изв. Вузов. Стр-во и архитектура*, 1988. № 9. С. 53–57.

**89.** Сычев М. М. Перспеквы повышения прочности цементного камня. *Цемент*. 1987. № 9. С. 17–19.

**90.** Сватовская Л. Б., Сычев М. М. Активированное твердение цементов. Л. : Стройиздат, 1983. 160 с.

**91.** Урьев Н. В. Высококонцентрированные дисперсные системы. М. : Химия, 1980. 320 с.

**92.** Соломатов В. И., Ракина Н. Н., Далевский А. К., Полемко Н. Л. Некоторые аспекты кластерообразования в композиционных материалах. *Изв. вузов. Стр-во и архитектура*, 1986. № 3. С. 52–56.

**93.** Соломатов В. И., Борбышев А. Н., Прошин Н. П. Кластеры в структуре и технологии композиционных строительных материалов. *Изв. Вузов. Стр-во и архитектура*,

1983. № 4. С. 56–61.

**94.** Соломатов В. И., Выровой В. Н. Кластерообразование композиционных строительных. *Технол. Механіка бетона*. РПИ : Рига, 1985. С. 5–21.

**95.** Соломатов В. И., Выровой В. Н., Сиренко А. В. Механизм образования дискретных структур при структурообразовании цементных композиций как высококонцентрированных систем. *Материалы конф. по фізико-химии получения и применения промывочных жидкостей, дисперсных систем и тампонажных растворов*. ИКХХВ АН УССР. К, 1985. С. 128.

**96.** Пинус Є. Р. Контактные слои цементного камня в бетоне и их значение. *Структура, прочность и деформации бетона*. М. : Стройиздат, 1966. С. 290–294.

**97.** Любимова Т. Ю., Н. В. Михайлов Н. В., Ребиндер П. А. Влияние кварцевого заполнителя на кинетику твердения минеральных вяжущих веществ. *Докл. АН СССР*. 1968. № 1. Т. 162. С. 144–147.

**98.** Дворкін, Л. Й., Дворкін О. Л., Гарніцький Ю. В. Модифіковані золівмісні сухі будівельні суміші для мурувальних та клейових розчинів. Рівне : НУВГП, 2013. 325 с.

**99.** Иванов И. А. Легкие бетоны на основе зол электростанций. М. : Стройиздат, 1986. 136 с.

**100.** Красный И. М. О механизме повышения прочности бетона при введении микронаполнителей. *Бетон и железобетон*. 1987. № 5. С. 10–11.

**101.** Зоткин А. Г. Микронаполняющий эффект минеральных добавок в бетоне. *Бетон и железобетон*. 1994. № 3. С. 7–9.

**102.** Власов В. К. Закономерности оптимизации состава бетона с дисперсными минеральными добавками. *Бетон и железобетон*. 1993. № 4. С. 10–12.

**103.** Каприелов С. С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов. *Бетон и железобетон*. 1995. № 6. С. 16–20.

**104.** Добавки в бетон : справ. пособие / В. С. Рамачандран, Р. Ф. Фельдман, М. Коллепарди и др. ; под ред. В. С. Рамачандрана. М. : Стройиздат, 1988. С. 168–184.

- 105.** Roberts L. R., Grace W. R. Microsilica in concrete.1 *Mater. Sci. Concr. I.* Westerville (Ohio), 1989. pp.197–222.
- 106.** Bendz Dale P., Garfodzi Edward J. Simulation studies of the effects of mineral admixtures on the cement paste-aggregate interfacial zone. *ACI Mater. J.* 1991. V. 88. № 8. pp.518–529.
- 107.** Larbi J. A., Bijen J. M. The chemistry of the pole fluid of silica fume-blended cement systems. *Cem. and Concr. Res.* 1990. V. 20. № 4. pp. 506–516.
- 108.** Каприелов С. С., Шейнфельд А. В. Микрокремнезем в бетоне. *Обзор. информ.* М. : ВНИИТПИ, 1993. 38 с.
- 109.** Джакупов К. К. Облицовочные материалы на основе отходов камнепиления известняка ракушечника : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 1996. 28 с.
- 110.** Каприелов С. С., Похлебкина Н. Ю. и др. Свойства бетонов с добавкой ультрадисперсных отходов ферросплавного производства. *Химические добавки для бетонов.* М. : НИИЖБ, 1987. С. 34–38.
- 111.** Ольгинский А. Г. Пылеватые минеральные добавки к цементным бетонам. *Строительные материалы и конструкции.* 1990. № 3. С. 18.
- 112.** Бабков В. В., Барангулов Р. И., Ананенко А. А. и др. О некоторых закономерностях связи структуры и прочности бетона. *Известия вузов. Строительство и архитектура.* 1983. № 2. С. 12–20.
- 113.** Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости / Соломатов В. И. и др. Киев : Будивельник, 1991. 241 с.
- 114.** Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости / Соломатов В. И., Выровой В. Н. и др. Киев : Будивельник, 1991. 144 с.
- 115.** Кукубу И. М. Зола и зольные цементы. *Пятый международный конгресс по химии цемента.* М. : Стройиздат, 1973. С. 405–416.
- 116.** Цилосани З. Н. Усадка и ползучесть бетона. Тбилиси : Мицнерсба, 1979. 228 с.
- 117.** Шейкин А. Е., Чеховский Ю. В., Бруссер М. И. Структура и свойства цементных бетонов. М. : Стройиздат, 1979. 344 с.

- 118.** Дворкин Л. И., Пресман И. Г. Использование золы-уноса ТЭС для приготовления бетонов и растворов при строительстве АЭС. *Информэнерго*. М., 1987. 52 с.
- 119.** Смит А. Э. Современный подход к применению золы-уноса в бетоне. *Технология товарной бетонной смеси*. М. : Стройиздат, 1981. С. 18–24.
- 120.** Стольников В. В. Использование золы-уноса от сжигания пылевидного топлива на тепловых электростанциях. Л. : Энергия, 1989. 50 с.
- 121.** Ковач Р. Процессы гидратации и долговечности зольных цементов. *Шестой Международный конгресс по химии цементов*. М. : Стройиздат, 1976. Т. 3. С. 91–102.
- 122.** Горчаков Г. И., Набоков А. Б., Припула С. Ф. Структура и морозостойкость гидротехнического бетона с добавкой золы-уноса ТЭС. *Материалы конф и совещаний по гидротехнике*. Л. : Энергия, 1978. Вып. 118. С. 80–85.
- 123.** Козлова В. К. Основные закономерности влияния зол каменных углей на состав и свойства строительных материалов: дис. ... д-ра техн. наук. Барнаул, 1978. 418 с.
- 124.** Соломатов В. И., Дворкин Л. И., Чудновский С. М. Пути активизации наполнителей композиционных строительных материалов. *Изв вузов. Стр-во и архитектура*, 1987. № 1. С. 60–63.
- 125.** Соломатов В. И., Тахиров М. Л., Тахер Мах. Интенсивная технология бетонов. М. : Стройиздат, 1989. 264 с.
- 126.** Зимон А. Д., Андрианов Е. Н. Аутогезия сыпучих материалов. *Металлургия*, 1978. 287 с.
- 127.** Мчедлов-Петросян О. П. Химия неорганических строительных материалов. М. : Стройиздат, 1988. 304 с.
- 128.** Хигерович М. И., Никитин Н. В. Замена извести в строительных растворах гидрофобизирующим карбонатным пластификатором. *Цемент*, 1958. № 5. С. 25–34.
- 129.** Круглицкий Н. Н., Васнер Г. Р., Прийма Е. И. Способы модификации микронаполнителей. *Строительные материалы и конструкции*. 1981. № 4. С. 27–33.
- 130.** Соломатов В. И. Элементы общей теории композиционных строительных материалов. *Изв. вузов*.

Строительство и архитектура, 1980. № 12. С. 61–70.

**131.** Скрамтаев Б. Г., Шубенкин П. Ф., Баженов Ю. М. Способы определения состава бетона различных видов. Москва : Стройиздат, 1966.

**132.** Гранковский И. Г. Структурообразование в минеральных вяжущих системах. Вып. 118. С. 80–85.

**133.** Кикас В. Х., Пунтес Р. Х. Изменение свойств цементной пасты и мелкозернистого бетона в зависимости от состава сланцезольного портландцемента и расхода добавки С-3. Таллинский политех. ин-т. Таллин, 1984. № 573. С. 11–26.

**134.** Ахвердов Н. И. Основы физики бетона. М. : Стройиздат, 1981. 464 с.

**135.** Рояк С. М., Рояк Г. С. Специальные цементы : учеб. пос. 2-е изд., перер. и доп. М. : Стройиздат, 1983. 279 с.

**136.** Хигерович М. И., Меркин А. П. Физико-химические и физические методы исследования строительных материалов. М. : Высшая школа, 1968. 191 с.

**137.** Powers T. Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. *Journal of American Ceramic Society*. 1958. 41. P. 18–26.

**138.** Дворкин Л. И. Оптимальное проектирование составов бетонов. Львов : Вища шк, 1989. 160 с.

**139.** Високомісні швидкотверднучі бетони та фібробетони / Дворкін Л. Й., Бабич Є. М., Житковський В. В., Бордюженко О. М. та ін. Рівне : НУВГП, 2017. 331 с.

**140.** Ng Ka Man. Studying the Production Process and Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete Made Using Local Available Materials. HONG KONG. 2009, pp. 263.

**141.** Калашников, В. И., Ананьев С. В., Архипов В. П., Мороз М. Н., Володин В. М., Валиев Д. М. Обеспечение оптимальной топологии самоуплотняющихся бетонных смесей для высокопрочных бетонов. *Новые энерго- и ресурсосберегающие наукоемкие технологии в производстве строительных материалов* : Международная научно-технической конференция. Издательство Пензенского ГУАС. Пенза, 2009. С. 46–51.

**142.** Дворкін Л. Й., Лушнікова Н. В., Рунова Р. Ф., Троян В. В.

Метакаолін в будівельних розчинах і бетонах : монографія. Київ : Вид-во КНУБіА, 2007. 214 с.

**143.** Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони : монографія. Дворкін Л. Й., Бабич Є. М., Житковський В. В., Бордюженко О. М., Кочкарьов Д. В., Філіпчук С. В., Ковалик І. В., Ковальчук Т. В., Скрипник М. М. Рівне : НУВГП, 2017. 331 с.

**144.** Дворкін Л. Й., Житковський В. В., Лушнікова Н. В. Ефективні литі бетони з добавкою цеолітових туфів. *Вісник НУВГП*. Вип. 4(28). Ч. 2. 2004. С. 25–32.

**145.** Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Житковський В. В. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту. Рівне : НУВГП, 2011. 174 с.

## **РОЗДІЛ II**

### **РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВИЙ ФІБРОБЕТОН**

#### **2.1. Вплив виду і вмісту сталевोї фібри та параметрів складу на міцнісні властивості реакційно-порошкових фібробетонів (РПФБ)**

##### **2.1.1. Вплив виду фібри на міцнісні показники РПФБ**

На даний час запропонована велика кількість видів сталевої фібри, які відрізняються геометричними параметрами та властивостями металу, з якого вони виготовлені. Найпоширенішими в Україні є різні види фібри із низьковуглецевої сталі трьох основних типів: пряма, хвилеподібна та анкерна, із загнутими або сплюсненими кінцями.

Найпоширеніші види сталевої фібри мають діаметр 0,8...1,0 мм при довжині 30...50 мм. Її найбільш доцільно використовувати для звичайних крупно- та дрібнозернистих фібробетонів із крупністю зерен заповнювача 5...20 мм. У реакційно-порошкових піщаних бетонах, у зв'язку з наявністю більшої кількості тонкодисперсних контактів і більшого об'єму тонкодисперсної фази, адгезійне зчеплення з поверхнею різних видів фібри і, особливо, мікрофібри буде значно вище [1]. Виходячи з цього, слід очікувати істотного зростання міцнісних показників фібробетонів та (або) зниження витрати фібри.

Наведені в літературі дані про вплив ступеня дисперсності армуючих волокон на міцність фібробетону при стиску суперечливі. Так, у роботах [2-4] констатується істотне збільшення міцності сталеві фібробетону при зменшенні діаметра армуючих волокон. При цьому доходять висновку про існування оптимального діаметру 0,3 мм. Відзначається також, що волокна діаметром 0,5 мм менш ефективні. За даними [6-8], найбільш раціональною для використання у реакційно-порошкових бетонах є фібра діаметром 0,2...0,4 мм. Разом з тим в [5] відзначено, що міцнісні властивості матеріалу мало залежать від діаметру армуючих волокон. В [9] запропоновано



використовувати в якості характеристики фібрового армування величину:

$$K = \mu_o \frac{l}{d}, \quad (2.1)$$

де  $\mu_o$  – коефіцієнт об'ємного армування  $l$  – довжина фібри, мм;  
 $d$  – діаметр фібри, мм.

Експериментально встановлене, що однаковим значенням  $K$ , при інших рівних умовах, відповідають однакові значення міцності сталевібробетону незалежно від абсолютних значень діаметрів фібр. За даними авторів зазначених робіт це є наслідком збільшення коефіцієнта орієнтації  $K$  за рахунок збільшення довжини фібр, і поліпшення умов їх анкеровки, зі збільшенням діаметру внаслідок надання їм періодичного профілю. Для звичайних крупно- та дрібнозернистих фібробетонів рекомендується [6; 9] для конструкцій, граничний стан яких лімітується несучою здатністю, застосовувати фібри діаметром 1,0...1,2 мм.

Існуючі дослідження [1; 10; 11] також вказують на можливість використання інших видів фібри як високомодульних, так і низькомодульних для виготовлення фібробетонів, зокрема РПФБ.

В дослідженнях використовували наступні види фібри (рис. 2.1):

- 1) сталеву хвилястутипу Fibax (Ф1);
- 2) сталеву анкерну із загнутими кінцями «Dramix» компанії «Besaert» (Ф2);
- 3) модифіковану базальтову фібру РБР-18-т10 ТзОВ "Технобазальт-Інвест" (м. Київ) довжиною 12 мм (Ф3);
- 4) поліпропіленову фібру довжиною 12 мм і діаметром 20-30 мкм (Ф4);
- 5) сталеву мікрофібру довжиною 13 мм і діаметром 0,25 мм виробництва Білоруського металургійного заводу (Ф5).

Основні характеристики цих видів фібри наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

## Види фібри: основні характеристики

Основні показники	Вид фібри				
	Хвиле-подібна Ф1	Анкерна із загну-тими кінцями Ф2	Базаль-това фібра Ф3	Поліпро-піленова фібра Ф4	Сталева мікро-фібра Ф5
Довжина (L), мм	60,0 ± 6,0	60,0 ± 6,0	12,0 ± 0,5	12,0 ± 0,3	13,0 ± 1
Діаметр (d), мм	1,0 ± 0,1	1,0 ± 0,1	(16±0,2)·10 <sup>-3</sup>	20-33·10 <sup>-3</sup>	0,25 ± 0,01
$\Lambda=L/d$	60	60	750	600	52
Тимчасовий опір розриву, МПа не менше	1335	1335	1800	400	2000
Температура плавлення, °C	1480	1480	1450	170	1485
Середня густина (ρ), г/см <sup>3</sup>	7,86	7,86	2,65	0,91	7,85

На першому етапі дослідження проводили з використанням трьох видів фібри: Ф1, Ф2 та Ф3.

Для встановлення виду фібри, що дозволяє отримати бетон з найбільш високими показниками міцності на розтяг при згині були проведені експерименти із застосуванням математичного планування [12]. Були реалізовані дві напіврепліки типу 2<sup>3-1</sup>. Умови планування експериментів наведені в табл. 2.2.



**Рис. 2.1.** Види фібри, що застосовувались в дослідженнях

Таблиця 2.2

Умови планування експериментів при виборі виду фібри

Фактори впливу		Рівні варіювання факторів	
Натуральний вид	Кодований вид	-1	+1
Вид фібри	$X_1$	Хвилеподібна/ Анкерна *	Сталева мікрофі- бра (Ф5)
Водоцементне відношення	$X_2$	$\frac{0,35^{**}}{0,3}$	$\frac{0,45}{0,35}$
Вміст цементу, кг/м <sup>3</sup>	$X_3$	500	600

\*- в першій напіврепліці була хвиляста фібра Ф1, а в другій – анкерна фібра із загнутими кінцями Ф2.

\*\* - в чисельнику значення В/Ц для дрібнозернистих бетонів(ДЗБ); в знаменнику – для РПБ.

Дослідження проводили на двох видах бетону: на дрібнозернистому із застосуванням в якості заповнювача фракційної суміші – 0,16...2 мм (кварцовий пісок) та 2...5 мм (гранітний щебінь) а також на РПБ наступного складу, кг/м<sup>3</sup>: портландцемент ПЦ 500 І – 600; мелений пісок ( $S_{\text{пнт}} = 250$  кг/м<sup>2</sup>) - 360; пісок (0,16...1,25 мм) – 1230. Витрата фібри складала 80 кг/м<sup>3</sup> ( $\mu = 1,0\%$ ). В бетонні суміші вводили добавку суперпластифікатора полікарбоксилатного типу Melflux 2651f. Бетонні суміші виготовляли з однаковою рухомістю ( $OK = 20$  см).

Попередньо були проведені досліди на двох видах бетону без використання фібри. Значення міцності при стиску та на розтяг при згині для дрібнозернистого та реакційно-порошкового бетонів наведені в табл. 2.3.

Як видно з наведених даних, вплив витрати цементу та водоцементного відношення на значення міцності є очікуваним. Збільшення В/Ц з 0,35 до 0,45 зменшує міцність при стиску на 15...20% і меншою мірою міцність на розтяг при згині. Збільшення витрати цементу при одному й тому ж В/Ц слабо позначається на значеннях міцності.

Таблиця 2.3

Значення міцності бетонів залежно від витрати цементу та В/Ц

В/Ц	Витрата цементу	Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб, МПа	Міцність на стиск у віці 7 діб, МПа	Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа	Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа
Дрібнозернистий бетон					
0,35	500	5,1	63,8	6,8	75,3
0,35	600	4,9	67,5	6,9	78,1
0,45	500	3,8	52,8	5,2	64,1
0,45	600	4,1	55,3	5,3	67,3
Реакційно-порошковий бетон					
0,3	500	10,6	70,1	13,6	89,9
0,3	600	11,5	73,3	14,4	93,5
0,35	500	8,9	70,6	11,2	79,8
0,35	600	9,3	72,1	11,6	83,2

Значення міцності при стиску для РПБ у порівнянні ДЗБ при однакових В/Ц та витраті цементу є більшими на 5...25% залежно від виду міцності та віку зразків. В той же час, міцність на розтяг при згині збільшується в середньому в 2 рази. Для дрібнозернистого бетону співвідношення  $f_{cm}/f_{c,tf}$  складає в середньому 11...12, тоді як для РПБ – 6...7.

В результаті реалізації двох напівреплік (табл. 2.2) та статистичної обробки експериментальних даних отримані поліноміальні моделі виду:

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 \quad (2.2)$$

Коефіцієнти математичних моделей міцності при стиску та при згині для **дрібнозернистого фібробетону** приведені в табл. 2.4.

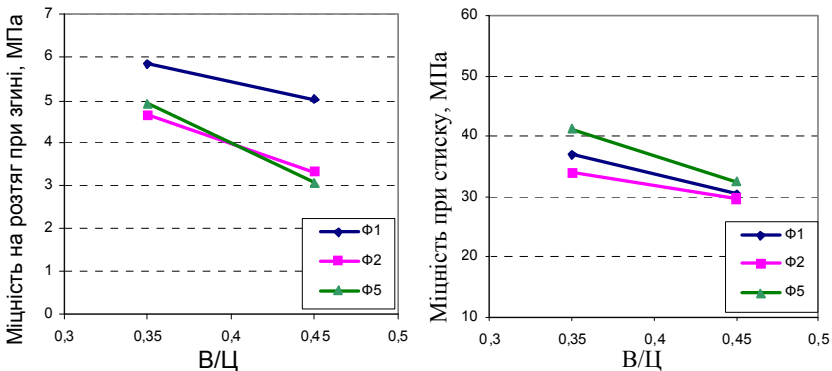
На рис. 2.2–2.4 наведені графічні залежності, що отримані відповідними розрахунками по моделях, які характеризують залежність міцності бетону на розтяг при згині ( $f_{c,tf}$ ) і стиску ( $f_{cm}$ ) у віці 1, 7 та 28 діб від В/Ц при використанні різних видів сталевих фібри.

Таблиця 2.4

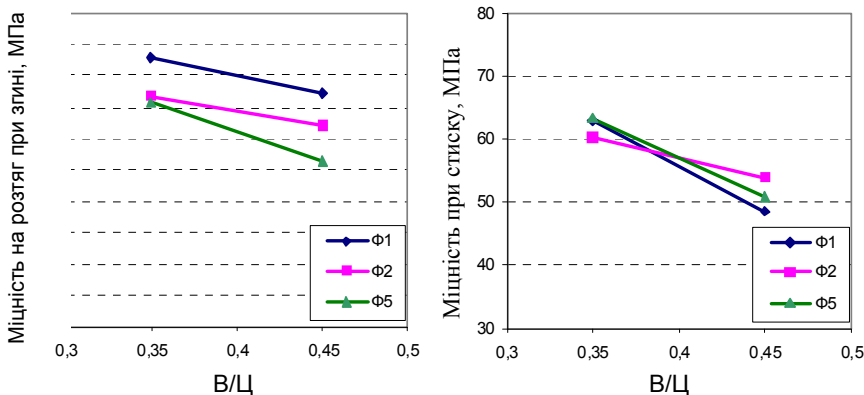
Коефіцієнти математичних моделей міцності  
з порівнянням видів фібри для ДЗБ

Вихідні параметри	Значення коефіцієнтів*				
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$
Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба, МПа	3,26/2,98	-1,37/-1,21	-0,2/-0,1	0,05/0,03	2,4/0,56
Міцність на стиск у віці 1 доба, МПа	38,2/39,1	-1,5/-2,3	-3,6/-2,1	0,9/2,5	0,3/1,1
Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб, МПа	4,55/4,48	-1,25/-1,33	-0,1/-0,2	0,1/0,03	0,1/0,03
Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа	6,0/5,78	-1,4/-1,63	-0,3/-0,3	0,2/0,18	0,2/0,18
Міцність на стиск у віці 7 діб, МПа	62,3/64,3	-2,25/-0,25	-6,8/-3,8	-2,3/0,75	-2,3/0,75
Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа	77,3/74,8	-3,5/-6	-5,3/-4,3	0,5/1,5	0,5/1,5

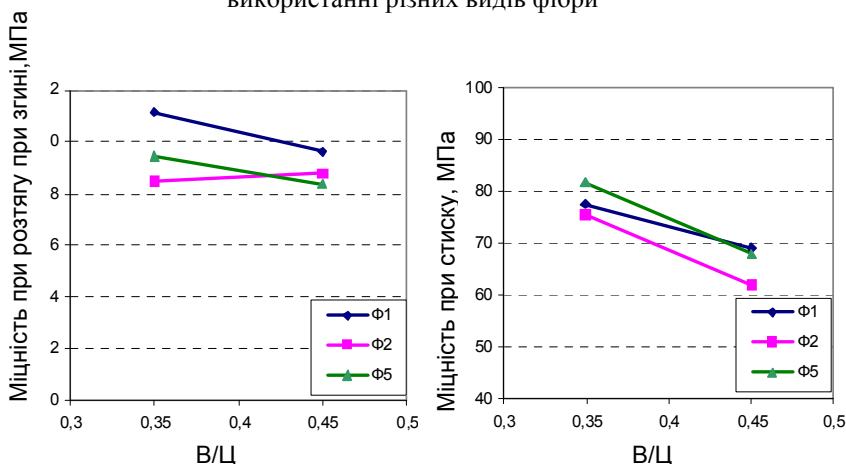
\*- над ризикою вказані коефіцієнти моделі з порівнянням мікрофібри Ф5 та хвилястої Ф1; під ризикою вказані коефіцієнти моделі з порівнянням мікрофібри Ф5 та анкерної фібри із загнутими кінцями Ф2.



**Рис. 2.2.** Розрахункові залежності міцності на розтяг при згині та стиску дрібнозернистого сталевібробетону у віці 1 доба від В/Ц при використанні різних видів фібри



**Рис. 2.3.** Розрахункові залежності міцності на розтяг при згині та стиску дрібнозернистого сталевібробетону у віці 7 днів від В/Ц при використанні різних видів фібри



**Рис. 2.4.** Розрахункові залежності міцності на розтяг при згині та стиску дрібнозернистого сталевібробетону у віці 28 днів від В/Ц при використанні різних видів фібри

Аналіз математичних моделей та графічних залежностей дозволяє зробити висновок, що найвищі значення міцності на розтяг при згині досягаються при використанні фібри хвилястого профілю Ф1. Це, очевидно, можна пояснити збільшеною поверхнею зчеплення такої фібри з розчином у порівнянні із анкерною фіброю. Сталева мікрофібра показує дещо гірші результати, що пояснюється співмірністю її довжини із максимальним значенням крупності заповнювача. В той же час, найвищі значення міцності при стиску досягаються при використанні сталеві мікрофібри, хоча різниця при використанні трьох видів фібри є несуттєвою.

Збільшення водоцементного відношення приводить до зменшення міцності у всі строки, причому більшою мірою міцності при стиску (на 20...30%).

Збільшення витрати цементу при постійному В/Ц очікувано приводить до зростання міцності, однак вплив даного фактору в межах області варіювання факторів можна вважати несуттєвим.

Коефіцієнти математичних моделей міцності при стиску та при згині для реакційно-порошкового фібробетону приведені в табл. 2.5.

На рис. 2.5–2.7 наведені графічні залежності, що отримані відповідними розрахунками по моделях, які характеризують залежність міцності РПФБ на розтяг при згині ( $f_{c,tf}$ ) і стиску ( $f_{cm}$ ) у віці 1, 7 та 28 діб від В/Ц при використанні різних видів сталеві фібри.

Аналіз математичних моделей (табл. 2.5) та графічних залежностей (рис. 2.5–2.7) дозволяє зробити висновок, що міцність реакційно-порошкового фібробетону у всі строки залежить від факторів впливу схожим чином, як і для дрібнозернистого фібробетону. В той же час абсолютні значення міцності на розтяг при згині є суттєво вищими у порівнянні із дрібнозернистим фібробетоном (ДЗФБ) (понад в 2 рази при використанні сталеві мікрофібри у віці 28 діб і на 20...30% при використанні інших видів). В реакційно-порошкових бетонах, в зв'язку з наявністю більшої кількості тонкодисперсних контактів і більшого обсягу тонкодисперсної фази, адгезійне зчеплення з поверхнею різних видів фібри і, особливо мікрофібри, є значно вищим.

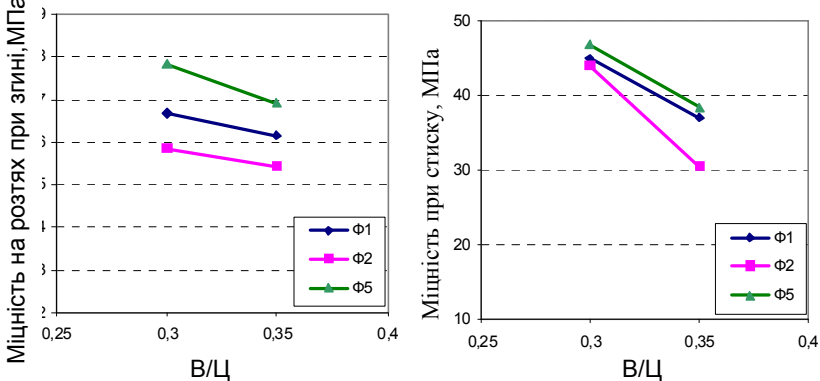


Таблиця 2.5

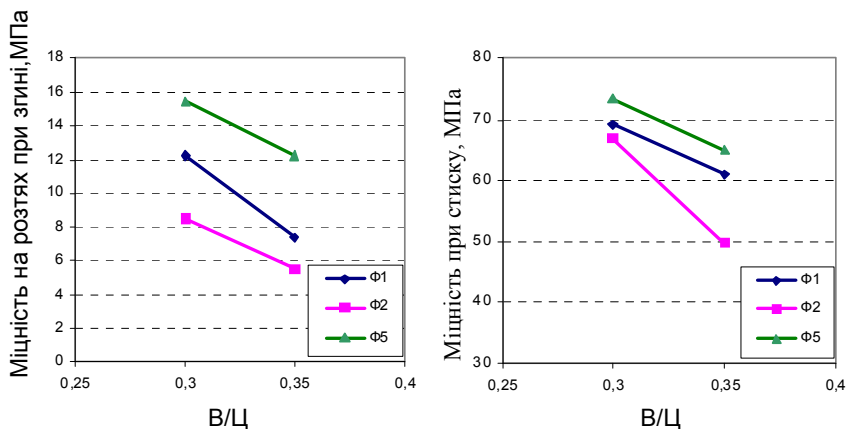
Коефіцієнти математичних моделей міцності з порівнянням  
видів фібри для РПБ

Вихідні параметри	Значення коефіцієнтів*				
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$
Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба, МПа	5,3/4,8 4	-1,65/- 2,05	-1,2/- 1,3	0,6/0,2 2	1,6/0, 18
Міцність на стиск у віці 1 доба, МПа	40,3/41 ,7	-1,3/- 1,8	-4,3/- 3,3	0,4/0,8	0,5/1, 2
Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб, МПа	7,32/6, 8	-2,3/- 1,7	-1,1/- 1,3	0,15/0, 2	0,15/ 0,9
Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа	10,2/11 ,3	-2,1/- 0,8	-0,9/- 1,2	0,3/0,4	0,26/ -0,3
Міцність на стиск у віці 7 діб, МПа	64,1/64 ,9	-1,35/- 0,25	-5,7/- 4,1	1,2/0,9 5	1,1/0, 9
Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа	80,1/77 ,8	-2,2/- 5,1	-4,2/- 3,2	0,9/1,2	3,5/0, 8

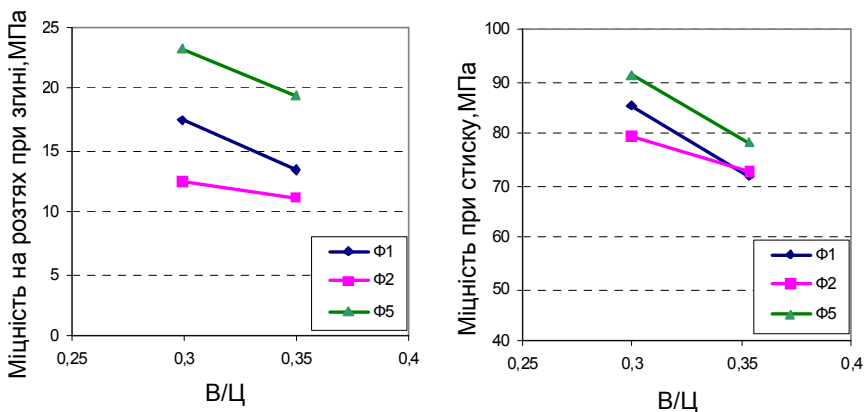
\*- над ризикою вказані коефіцієнти моделі з порівнянням мікрофібри Ф5 та хвилястої Ф1; під ризикою вказані коефіцієнти моделі з порівнянням мікрофібри Ф5 та анкерної фібри із загнутими кінцями Ф2.



**Рис. 2.5.** Розрахункові залежності міцності на розтяг при згині та стиску реакційно-порошкового фібробетону у віці 1 доба від V/C при використанні різних видів фібри



**Рис. 2.6.** Розрахункові залежності міцності на розтяг при згині та стиску реакційно-порошкового фібробетону у віці 7 діб від В/Ц при використанні різних видів фібри



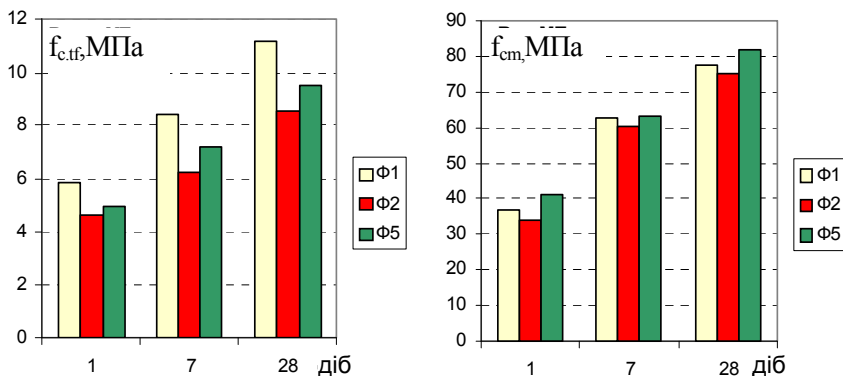
**Рис. 2.7.** Розрахункові залежності міцності на розтяг при згині та стиску реакційно-порошкового фібробетону у віці 28 діб від В/Ц при використанні різних видів фібри

Міцність при стиску також зростає (в середньому в межах 10%) залежно від виду фібри та віку зразків.

Найвищі значення міцності як при стиску, так і при згині досягаються при використанні сталевий мікрофібри Ф5. Очевидно, що при тій же об'ємній витраті, що і для інших видів фібр, сумарна площа поверхні мікрофібри, а і відповідно площа поверхні контакту її з реакційно-порошковою матрицею є більшою.

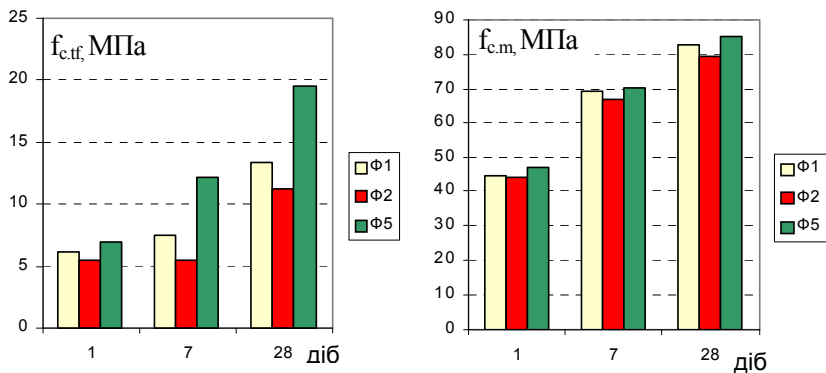
Збільшення водоцементного відношення приводить до зменшення міцності у всі строки, причому більшою мірою міцності при стиску.

Розглядаючи кінетику зростання міцності у часі (рис. 2.8, 2.9), можна відзначити, що її значення у віці 1 доба складає близько 50% від 28-добового значення, а у віці 7 діб – близько 80%.



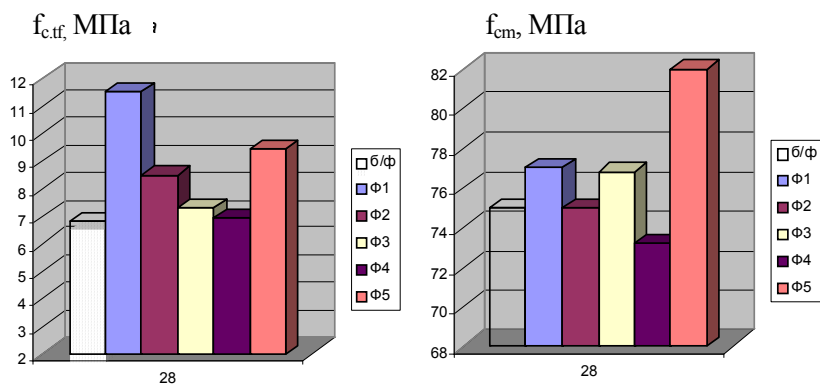
**Рис. 2.8.** Кінетика зростання міцності на розтяг при згині та стиску дрібнозернистого сталевібробетону з різними видами фібри

Перший етап дослідження показав найбільш ефективним використання для РПФБ сталевий мікрофібри фібри типу Ф5. Для порівняння ефективності дисперсного армування на ще двох видах фібри, а саме базальтової (Ф3) та поліпропіленовий (Ф4) на другому етапі було проведено ряд окремих дослідів.

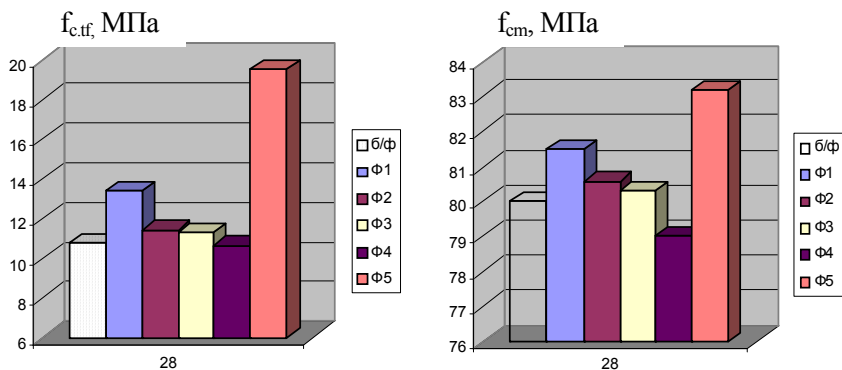


**Рис. 2.9.** Кінетика зростання міцності на розтяг при згині та стиску реакційно-порошкового сталевібробетону з різними видами фібри

Фібробетонні зразки виготовлялися на сумішах з В/Ц = 0,35 та при витраті цементу 500 кг/м<sup>3</sup>. Забезпечення однакової рухомості суміші досягали відповідною витратою добавки суперпластифікатора. В усіх випадках об'ємна витрата фібра була однаковою ( $\mu = 1,0\%$ ).



**Рис. 2.10.** Вплив виду фібри на значення міцності на розтяг при згині та стиску дрібнозернистого фібробетону у віці 28 діб ( $\mu = 1,0\%$ ) \* б/ф – без фібри



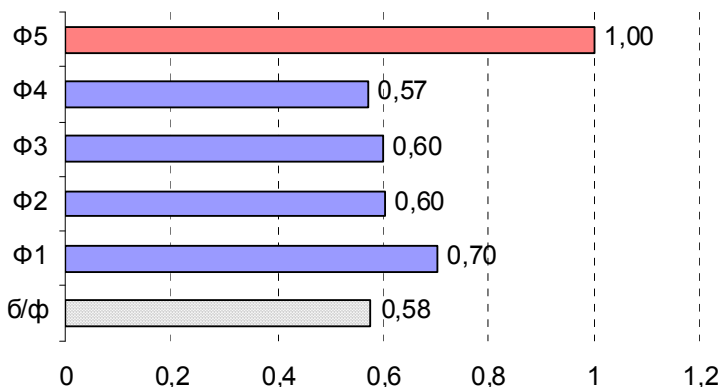
**Рис. 2.11.** Вплив виду фібри на значення міцності на розтяг при згині та стиску реакційно-порошкового фібробетону у віці 28 діб ( $\mu = 1,0\%$ ) \* 6/ф – без фібри

Порівняльні діаграми міцності для зразків з використанням всіх видів фібри та без неї наведено на рис. 2.10, 2.11.

Як видно з одержаних результатів, базальтова фібра (Ф3) показала деякий приріст міцності на розтяг при згині у порівнянні із базовим складом, особливо для реакційно-порошкового бетону, але в той же час вона значно поступається хвилястій фібрі Ф1 і, особливо, сталевій мікрофібрі Ф5. Поліпропіленова фібра Ф4 показала найгірші результати і практично не змінила міцність при стиску та на розтяг при згині порівняно із базовим складом..

Основний ефект від дисперсного армування бетонів, зокрема реакційно-порошкових, проявляється у збільшенні співвідношення  $f_{c,tf} / f_{cm}$ . Це можна явно прослідкувати з рис. 2.12, на якому відображені відносні коефіцієнти ефективності дисперсного армування різними видами фібри для дрібнозернистого бетону.

За одиницю прийняте співвідношення  $f_{c,tf} / f_{cm}$  для реакційно-порошкового фібробетону з використанням фібри Ф5. Для бетону на всіх видів фібри коефіцієнт ефективності є більший ніж для бетону, не армованого фіброю.



**Рис. 2.12.** Значення відносного коефіцієнта ефективності дисперсного армування при використанні різних видів фібр для реакційно-порошкового бетону

Розглядаючи три види сталеві фібри необхідно відзначити, що тонка фібра діаметром 0,25 мм, при заданому об'ємному вмісті дозволяє отримати досить насичений дисперсно-армований композит в порівнянні з дискретно-армованим матеріалом з використанням фібри діаметром 1 мм.

Переваги тонкої фібри було показано в роботі [1]. Основний висновок, отриманий в цій роботі, полягає в тому, що при однаковому ступені армування бетонів фіброю з діаметрами  $D$  і  $d$  розрахункова кількість волокон в них співвідноситься як  $D^2/d^2$ , а відстані між поверхнями сусідніх фібр співвідносяться як  $D/d$ . Таким чином, якщо замість фібри діаметром 0,8 мм використовувати фібру 0,15 мм, то  $D^2/d^2$  рівне 28,4. Одна фібра  $D = 0,8$  мм замінюється 28 волокнами діаметром 0,15 мм.

### 2.1.2. Вибір оптимального вмісту фібри

З підвищенням об'ємної концентрації дисперсного армування фізико-механічні характеристики фібробетону зростають до певного рівня, після досягнення якого характеристики починають знижуватись [13]. Тому існує певне співвідношення об'ємів волокна й матриці, при яких фізико-механічні характеристики фібробетону будуть мати максимальне значення.

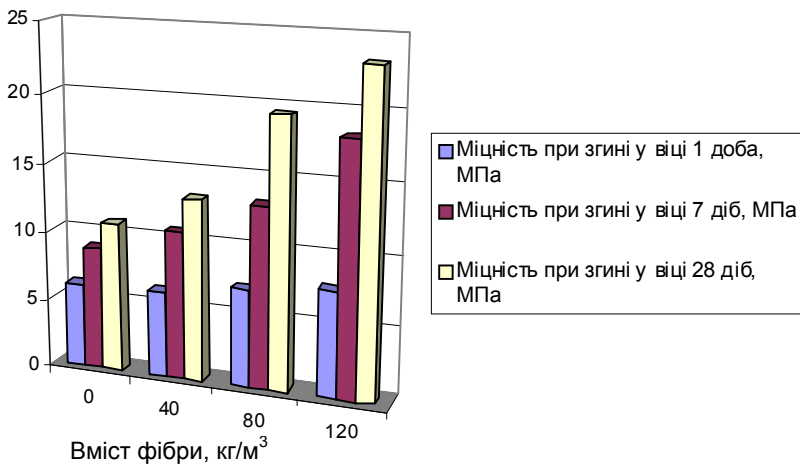
Для класичних фібробетонів встановлено [14], що в інтервалі мінімального й максимального відсотка армування ( $\mu_{\min}$  –  $\mu_{\max}$ ) має місце характерна точка, що відповідає моменту утворення фіброцементного каркаса ( $\mu_k$ ), до і після якої поведінка композита та його властивості суттєво відрізняються.

Оптимальне значення вмісту сталевий мікрофібри визначали з урахуванням забезпечення максимального значення міцності на розтяг при згині РПФБ.

Попередньо було проведено прямі дослідження, результати яких наведені в табл. 6.6 та на рис. 6.13. Дослідження проводили на реакційно-порошковому фібробетоні наступного складу, кг/м<sup>3</sup>: портландцемент ПЦ 500 І – 600; мелений пісок ( $S_{\text{пит}} = 250$  кг/м<sup>2</sup>) – 360; пісок (0,16...1,25 мм) – 1230; СП Dynamon SP3 – 1,5%. В/Ц = 0,3.

Таблиця 2.6  
Дослідження впливу вмісту сталевий мікрофібри на  
міцність при згині РПФБ

Вміст фібри, кг/м <sup>3</sup>	Об'ємний вміст фібри $\mu$ , %	Міцність при згині у віці 1 доба, МПа	Міцність при згині у віці 7 днів, МПа	Міцність при згині у віці 28 днів, МПа
0	0	6,1	8,9	10,8
40	0,51	6,2	10,7	13,1
80	1,03	7,1	13,1	19,5
120	1,54	7,7	18,3	23,2



**Рис. 2.13.** Діаграма впливу вмісту фібри на міцність на розтяг при згині РПФБ

Відомо, що для дрібнозернистого сталевібробетону з використанням фібри діаметром 0,8...1 мм та довжиною 50...60 мм оптимальний вміст дисперсної арматури знаходиться в межах до  $\mu=1,5\%$ . В нашому випадку, очевидно що цей вміст має бути більшим. Тому метою роботи на наступному етапі досліджень було встановлено комплексного впливу на міцнісні характеристики РПП витрати цементу, сталеві мікрофібри фібри та водоцементного відношення. Для цього був реалізований трьохрівневий трьохфакторний, близький до D – оптимального, план [12]. Умови планування експерименту та результати досліджень наведені в табл. 2.7 та табл. 2.8 відповідно.

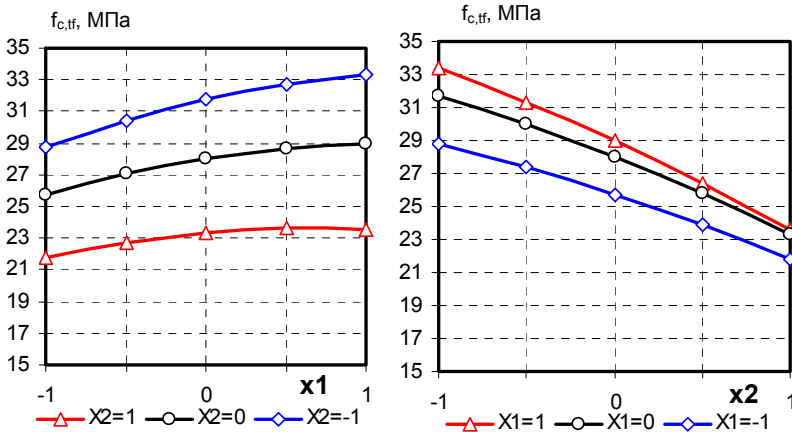
Після проведення обробки та статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі міцності дрібнозернистого сталевібробетону на стиск та розтяг при згині у вигляді поліноміальних рівнянь регресії. Результати обробки та статистичного аналізу експериментальних даних наведені в табл. 2.9 та на рис. 2.14-2.17.



Таблиця 2.7

Умови планування експерименту при визначенні параметрів складів реакційно-порошкових фібробетонів

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Код	Натуральний вид	-1	0	+1	
1	$X_1$	Витрата цементу, $\text{кг/м}^3$ (Ц)	500	600	700	100
2	$X_2$	В/Ц	0,2 5	0,3	0,35	0,05
3	$X_3$	Витрата сталевих мікрофібри, $\text{кг/м}^3$ (Ф)	120	180	240	60



**Рис. 2.14.** Залежність міцності на розтяг при згині реакційно-порошкового фібробетону у віці 28 днів від витрати цементу ( $X_1$ ) та В/Ц ( $X_2$ )

Таблиця 2.8

Експериментальні результати по визначенню параметрів складів РПФБ

№ т. плану	Кодовані значення факторів			Витрати компонентів, кг/м <sup>3</sup>					В/Ц	Dynam on, %	$f_{cm}^1$ , МПа	$f_{c,tf}^1$ , МПа	$f_{cm}^7$ , МПа	$f_{c,tf}^7$ , МПа	$f_{cm}^{28}$ , МПа	$f_{c,tf}^{28}$ , МПа
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	Ц	МП	П	В	Ф								
1	+	+	+	700	732	895	245	240	0,35	0,29	43,5	10,8	65,7	16,1	96,6	25,6
2	+	+	-	700	732	895	245	120	0,35	0,15	40,8	8,5	61,6	12,8	90,6	20,3
3	+	-	+	700	732	895	175	240	0,25	1,60	63,8	13,2	96,4	19,8	141,8	31,4
4	+	-	-	700	732	895	175	120	0,25	1,16	59,2	12,0	89,5	18,0	131,6	28,5
5	-	+	+	500	820	1002	175	240	0,35	0,58	35,4	8,9	53,4	13,3	78,6	21,1
6	-	+	-	500	820	1002	175	120	0,35	0,29	30,6	7,9	46,3	11,9	68,1	18,9
7	-	-	+	500	820	1002	125	240	0,25	1,89	48,8	10,9	73,8	16,3	108,5	25,9
8	-	-	-	500	820	1002	125	120	0,25	1,45	48,0	9,8	72,6	14,7	106,7	23,4
9	+	0	0	700	732	895	210	180	0,3	0,65	52,3	13,4	79,1	20,1	116,3	31,9
10	-	0	0	500	820	1002	150	180	0,3	0,39	38,9	10,2	58,8	15,3	86,4	24,3
11	0	+	0	600	806	986	210	180	0,35	0,44	44,5	10,6	67,2	15,9	98,8	25,2
12	0	-	0	600	806	986	150	180	0,25	0,73	56,5	13,9	85,4	20,9	125,6	33,1
13	0	0	+	600	806	986	180	240	0,3	0,44	48,1	12,7	72,6	19,0	106,8	30,2
14	0	0	-	600	806	986	180	120	0,3	0,15	44,6	9,8	67,4	14,7	99,1	23,4
15	0	0	0	600	806	986	180	180	0,3	0,29	48,1	12,1	72,6	18,2	106,8	28,9
16	0	0	0	600	806	986	180	180	0,3	0,29	48,2	12,1	72,9	18,1	107,2	28,8
17	0	0	0	600	806	986	180	180	0,3	0,29	48,8	12,1	73,7	18,1	108,4	28,7

Таблиця 2.9

Математичні моделі міцнісних параметрів реакційно-порошкових фібробетонів

Вихідний параметр		Математичні моделі
Міцність при стиску у віці:	1 доба	$f_{cm}^1 = 41,4 + 1,4 \cdot X_1 - 8 \cdot X_2 + 0,3 \cdot X_3 - 0,2 \cdot X_1^2 + 0,2 \cdot X_2^2 - 0,4 \cdot X_1 \cdot X_2$ (2.3)
	7 діб	$f_{cm}^7 = 87,5 + 3,3 \cdot X_1 - 11,6 \cdot X_2 + 0,1 \cdot X_3 - 0,9 \cdot X_1^2 - 1,2 \cdot X_2^2 - 0,9 \cdot X_3^2 - 0,4 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,6 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,1 \cdot X_2 \cdot X_3$ (2.4)
	28 діб	$f_{cm}^{28} = 107,4 + 12,9 \cdot X_1 - 18,1 \cdot X_2 + 3,6 \cdot X_3 - 5,8 \cdot X_1^2 + 5,1 \cdot X_2^2 - 4,1 \cdot X_3^2 - 2,2 \cdot X_1 \cdot X_2$ (2.5)
Міцність на розтяг при згині у віці:	1 доба	$f_{c,tf}^1 = 9,4 + 0,26 \cdot X_1 - 0,91 \cdot X_2 + 0,6 \cdot X_3 + 0,077 \cdot X_1^2 + 0,07 \cdot X_2^2 - 1,02 \cdot X_3^2 - 0,43 \cdot X_1 \cdot X_2$ (2.6)
	7 діб	$f_{c,tf}^7 = 16,6 + 0,61 \cdot X_1 - 1,72 \cdot X_2 + 1,5 \cdot X_3 + 0,333 \cdot X_1^2 + 0,407 \cdot X_2^2 - 2,8 \cdot X_3^2 - 0,86 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1,128 \cdot X_1 \cdot X_3$ (2.7)
	28 діб	$f_{c,tf}^{28} = 29,3 + 2,41 \cdot X_1 - 3,12 \cdot X_2 + 1,92 \cdot X_3 - 1,52 \cdot X_1^2 - 0,47 \cdot X_2^2 - 2,81 \cdot X_3^2 - 0,59 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,44 \cdot X_1 \cdot X_3$ (2.8)

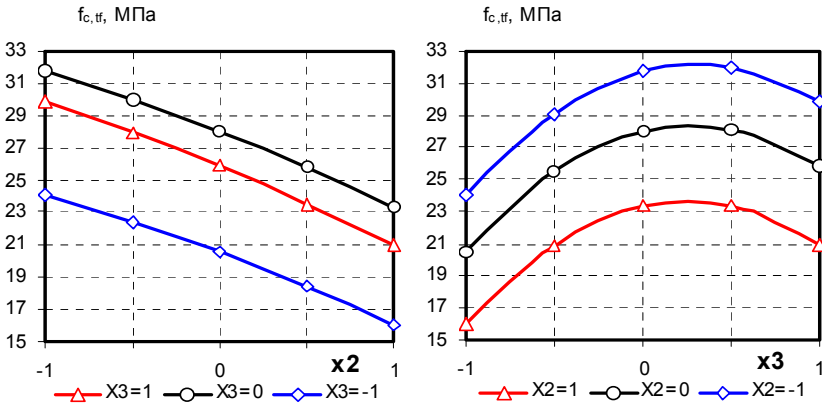
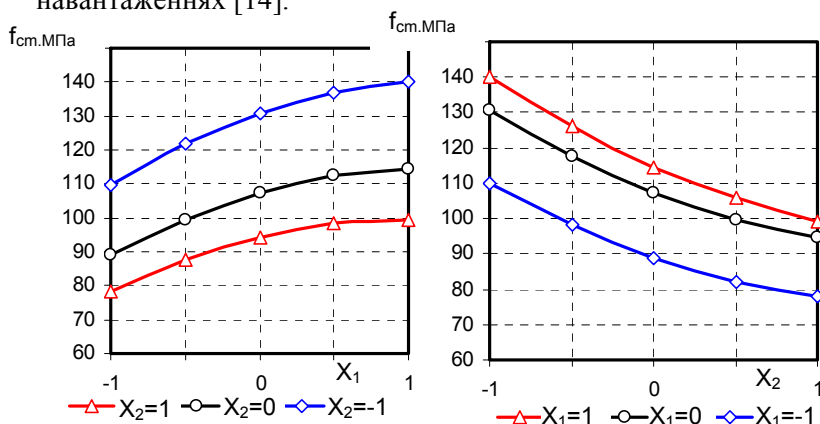
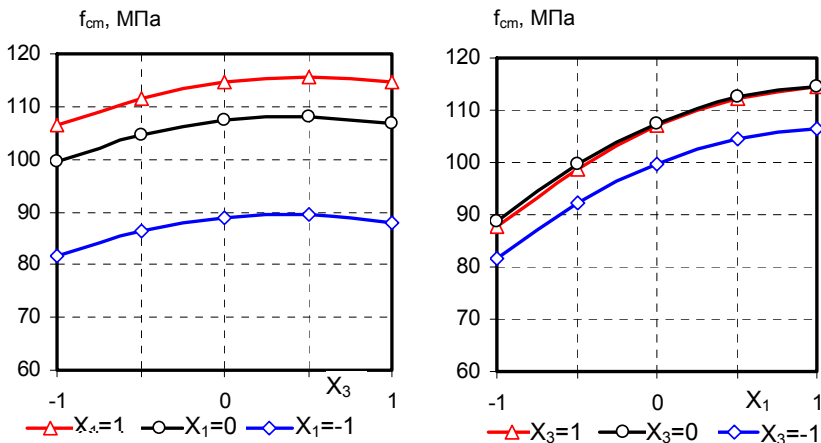


Рис. 2.15. Залежність міцності на розтяг при згині реакційно-порошкового фібробетону у віці 28 діб від В/Ц ( $X_2$ ) та витрати фібри ( $X_3$ )

Результати аналізу отриманих математичних моделей та побудованих на їх основі графічних залежностей свідчить про те, що найбільш суттєвий вплив на міцність реакційно-порошкового фібробетону на розтяг при згині чинить вміст фібри, причому вплив даного фактору носить екстремальний характер. Збільшення вмісту фібри від 120 до 180...200 кг/м<sup>3</sup> призводить до збільшення міцності на розтяг при згині в середньому на 40...50%, подальше ж збільшення кількості сталеві мікрофібри суттєво не впливає на міцність РПФБ на розтяг при згині. Більше того, спостерігається деяке зменшення значення  $f_{c,tf}$ . Тобто у відповідності з отриманими експериментальними результатами було встановлено оптимальний вміст сталеві фібри, який забезпечує максимальну міцність фібробетону на розтяг при згині. Подальше збільшення вмісту дисперсної арматури призводить до зниження міцності, що обумовлено складністю підтримання заданої рухомості суміші а також зменшенням товщини матричного шару настільки, що фібробетонна суміш проявляла схильність до розшарування навіть при невеликих навантаженнях [14].



**Рис. 2.16.** Залежність міцності при стиску реакційно-порошкового фібробетону у віці 28 діб від витрати цементу ( $X_1$ ) та В/Ц ( $X_2$ )



**Рис. 2.17.** Залежність міцності при стиску реакційно-порошкового фібробетону у віці 28 діб від витрати цементу ( $X_1$ ) та витрати фібри ( $X_3$ )

Щодо міцності на стиск, то аналізуючи отримані експериментально-статистичні моделі, можна прийти до висновку, що найбільш суттєвим фактором, який впливає на міцність реакційно-порошкового фібробетону, у різні терміни твердіння, є водоцементне відношення, зменшення, якого від  $V/C=0,35$  до  $V/C=0,25$  призводить до збільшення міцності на 45% у віці 1 доби, на 40% у віці 7 діб та на 35% у віці 28 діб. Вплив даного фактору носить майже лінійний характер і він складає близько 60% впливу всіх інших факторів. Збільшення витрати цементу також позначається на міцнісних показниках, хоча і спостерігається тенденція до досягнення оптимального значення витрати цементу (близько  $700 \text{ кг/м}^3$ ) за даних умов експерименту.

Збільшення витрати фібри в варійованих межах при постійному водоцементному відношенні суттєво не впливає на міцність досліджуваних фібробетонів. Також, як і у випадку границі міцності на розтяг при згині можна відмітити зону оптимального вмісту сталеві мікрофібри –  $180 \dots 200 \text{ кг/м}^3$ , що

відповідає об'ємному вмісту 2,3...2,5%. За впливом варійованих факторів на міцність реакційно-порошкового фібробетону на стиск їх можна розташувати в ряду:  $X_2 > X_1 > X_3$ .

Таким чином в результаті експериментальних досліджень було встановлено можливість отримання РПФБ, що характеризується міцністю при стику понад 130 МПа, при забезпеченні міцності при згині майже 30 МПа.

## **2.2. Вплив складу реакційно-порошкового бетону на міцнісні властивості РПФБ**

Реакційно-порошкові бетони є найбільш зручною матрицею для отримання фібробетонів. У них відсутній крупний заповнювач, що заважає самоорганізованому розподіленню і розміщення фібри, а також сприяє скупчення її між зернами щебеню.

Склади реакційно-порошкових бетонів для РПФБ підбиралися виходячи зі співвідношення компонентів шляхом пробних замісів, з яких були отримані бетонні суміші з максимальною рухомістю і підвищеною міцністю. Шляхом напрацювання різних складів з близькими витратами цементу обирався базовий склад, який шляхом оптимізації співвідношень компонентів при підвищеній міцності бетону, приводився до найбільш оптимального.

В дослідженнях використовували чотири склади РПБ на основі яких виготовляли РПФБ з різним вмістом сталеві мікрофібри, кг/м<sup>3</sup>:

- РПФБ1: портландцемент ПЦ 500 І – 700; мелений пісок ( $S_{\text{пнт}} = 250 \text{ кг/м}^2$ ) – 350; пісок (0,16...1,25 мм) – 1130;

- РПФБ2: цемент – 700; мелений доменний гранульований шлак ( $S_{\text{пнт}} = 260 \text{ кг/м}^2$ ) – 350; пісок (0,16...1,25 мм) - 1130;

- РПФБ3: цемент – 700; зола Бурштинської ТЕС ( $S_{\text{пнт}} = 250 \text{ кг/м}^2$ ) – 350; пісок (0,16...1,25 мм) – 1130;

- РПФБ4: цемент – 700; зола – 275; метакаолін – 75, пісок (0,16...1,25 мм) – 1130.

Фібробетонні суміші характеризувались значеннями  $V/C = 0,27 \dots 0,3$  із рухомістю  $OK = 20 \dots 25$  см.

Приготування сумішей починали з заливання в змішувач води з необхідною кількістю суперпластифікатора. При включеному міксері в воду засипали суміш цементу з наповнювачем, потім після перемішування протягом 30 сек. поступово висипали пісок-заповнювач. Перемішування бетонної суміші здійснювалося міксером при швидкості обертання 300-600 об/хв. Повний період приготування суміші становив 3,0-3,5 хв.

Для контролю рухомості сумішей визначали осадку конуса. З цією метою використовували малий усічений конус з нержавіючої сталі з розмірами  $d_1 = 100$  мм;  $d_2 = 50$  мм;  $H = 20$  см. Перехід до осадки стандартного конуса був здійснений за результатами теоретичних розрахунків по перетворенню об'єму конуса в рівнооб'ємний кульовий сегмент при розтіканні. В результаті була отримана наступна формула:

$$OK_{ст} = -0,0089 \cdot OK_M^2 + 1,27 \cdot OK_M + 0,68, \quad (2.9)$$

де  $OK_{ст}$  і  $OK_M$  – відповідно осадка стандартного і малого конуса

Встановлена залежність добре підтверджувалася для самоупільнюваних бетонних сумішей з похибкою 2...5%.

Результати досліджень властивостей РПФБ та сумішей з використанням реакційно-порошкових бетонів з різним складом наведені в табл. 2.9-2.11.

Таблиця 2.9

Технологічні показники та міцнісні властивості реакційно-порошкових бетонів

Витрата основних компонентів, кг/м <sup>3</sup>	Позначення РПБ			
	РПБ1	РПБ2	РПБ3	РПБ4
Портландцемент	700	700	700	700
Пісок кварцовий 0,16...1,25 мм	1130	1130	1130	1130
Пісок кварцевий мелений	350			
Шлак доменний гранульований мелений		350		
Зола			350	275
Метакаолін				75
СП Дунатон SP3, % від цементу	1,5	1,35	1,65	1,42
СП Дунатон SP3, кг/м <sup>3</sup>	10,5	9,45	11,55	9,94
Витрата води та маса суміші				
Маса сухої суміші, кг/м <sup>3</sup>	2191	2189	2192	2190
Вода, кг/м <sup>3</sup>	190	194	202	191
Маса бетонної суміші, кг/м <sup>3</sup>	2381	2383	2394	2381
Реологічні показники				
В/Ц	0,271	0,277	0,289	0,273
В/Т	0,087	0,089	0,093	0,088
ОК, см	25	26	25	27
Міцність при стиску, МПа				
$f_{cm}^1$	32,6	32,0	31,7	34,4
$f_{cm}^7$	68,4	67,0	66,5	72,2
$f_{cm}^{28}$	<b>96,2</b>	<b>94,3</b>	<b>93,5</b>	<b>101,6</b>
Міцність на розтяг при згині, МПа				
$f_{c,tf}^1$	8,5	8,2	7,9	8,4
$f_{c,tf}^7$	10,2	11,1	10,5	11,1
$f_{c,tf}^{28}$	<b>14,2</b>	<b>14,9</b>	<b>14,92</b>	<b>16,2</b>
Відносні та питомі показники				
$f_{cm}^{28}/f_{c,tf}^{28}$	<b>6,77</b>	<b>6,33</b>	<b>6,11</b>	<b>6,27</b>
Ц/ $f_{c,tf}^{28}$ , кг/МПа	49,3	47,0	45,8	43,2
Ц/ $f_{cm}^{28}$ , кг/МПа	7,3	7,4	7,5	6,9

\*В/Т – водо–тверде відношення.



Таблиця 2.10

Технологічні показники та міцнісні властивості реакційно-порошкових фібробетонів при витраті фібри 1,54% об.

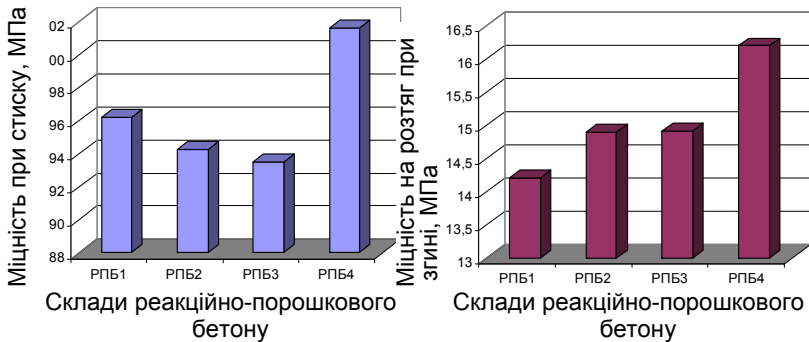
Витрата основних компонентів, кг/м <sup>3</sup>	Позначення РФПБ			
	РПФБ1	РПФБ2	РПФБ3	РПФБ4
Портландцемент	700	700	700	700
Пісок кварцовий 0,16...1,25 мм	1130	1130	1130	1130
Пісок кварцевий мелений	350			
Шлак доменний гранульований мелений		350		
Зола			350	275
Метакаолін				75
СП Дунатон SP3, % від цементу	1,55	1,25	1,65	1,45
СП Дунатон SP3, кг/м <sup>3</sup>	10,85	8,75	11,55	10,15
Фібра, % об.	1,54	1,54	1,54	1,54
Фібра, кг/м <sup>3</sup>	120	120	120	120
Витрата води та маса суміші				
Маса сухої суміші (без фібри), кг/м <sup>3</sup>	2191	2189	2192	2190
Вода, кг/м <sup>3</sup>	193	195	199	196
Маса бетонної суміші з фіброю, кг/м <sup>3</sup>	2504	2504	2511	2506
Реологічні показники				
В/Ц	0,276	0,279	0,284	0,280
В/Т	0,089	0,089	0,091	0,090
ОК, см	24	27	26	24
Міцність при стиску, МПа				
$f_{cm}^1$	44,8	43,7	44,3	45,2
$f_{cm}^7$	94,0	91,7	92,9	94,8
$f_{cm}^{28}$	<b>132,2</b>	<b>128,9</b>	<b>130,7</b>	<b>133,4</b>
Міцність на розтяг при згині, МПа				
$f_{c,tf}^1$	7	7,6	7,2	8,1
$f_{c,tf}^7$	16,3	18,6	15,6	18,1
$f_{c,tf}^{28}$	<b>23,8</b>	<b>24,1</b>	<b>22,1</b>	<b>28,8</b>
Відносні та питомі показники				
$f_{cm}^{28}/f_{c,tf}^{28}$	<b>4,72</b>	<b>4,46</b>	<b>4,93</b>	<b>3,87</b>
$\rho/f_{c,tf}^{28}$ , кг/МПа	24,6	24,2	26,4	20,3
$\rho/f_{cm}^{28}$ , кг/МПа	5,2	5,4	5,4	5,2
$\Phi/f_{c,tf}^{28}$ , кг/МПа	4,21	4,15	4,53	3,48
$\Phi/f_{cm}^{28}$ , кг/МПа	0,89	0,93	0,92	0,90

Таблиця 2.11

Технологічні показники та міцнісні властивості реакційно-порошкових фібробетонів при витраті фібри 3,08% об.

Витрата основних компонентів, кг/м <sup>3</sup>	Позначення РФПБ			
	РПФБ1	РПФБ2	РПФБ3	РПФБ4
Портландцемент	700	700	700	700
Пісок кварцовий 0,16...1,25 мм	1130	1130	1130	1130
Пісок кварцевий мелений	350			
Шлак доменний гранульований мелений		350		
Зола			350	275
Метакаолін				75
СП Dynapom SP3, % від цементу	1,63	1,34	1,7	1,55
СП Dynapom SP3, кг/м <sup>3</sup>	11,41	9,38	11,9	10,85
Фібра, % об.	3,08	3,08	3,08	3,08
Фібра, кг/м <sup>3</sup>	240	240	240	240
Витрата води та маса суміші				
Маса сухої суміші (без фібри), кг/м <sup>3</sup>	2191	2189	2192	2191
Вода, кг/м <sup>3</sup>	197	203	205	202
Маса бетонної суміші з фіброю, кг/м <sup>3</sup>	2628	2632	2637	2633
Реологічні показники				
В/Ц	0,281	0,290	0,293	0,289
В/Т	0,090	0,093	0,094	0,093
ОК, см	25	24	23	22
Міцність при стиску, МПа				
$f_{cm}^1$	48,6	48,0	47,0	48,6
$f_{cm}^7$	102,0	100,7	98,6	101,9
$f_{cm}^{28}$	<b>143,4</b>	<b>141,65</b>	<b>138,7</b>	<b>143,3</b>
Міцність на розтяг при згині, МПа				
$f_{c,tf}^1$	10,7	11,6	12,5	13,1
$f_{c,tf}^7$	26,6	28,9	26,2	27,2
$f_{c,tf}^{28}$	<b>31,5</b>	<b>33,7</b>	<b>28,5</b>	<b>36,6</b>
Відносні та питомі показники				
$f_{cm}^{28}/f_{c,tf}^{28}$	<b>4,55</b>	<b>4,20</b>	<b>4,87</b>	<b>3,92</b>
$\Pi/f_{c,tf}^{28}$ , кг/МПа	22,2	20,8	24,6	19,1
$\Pi/f_{cm}^{28}$ , кг/МПа	4,9	4,9	5,0	4,9
$\Phi/f_{c,tf}^{28}$ , кг/МПа	7,62	7,12	8,42	6,56
$\Phi/f_{cm}^{28}$ , кг/МПа	1,67	1,69	1,73	1,67

Аналіз отриманих даних вказує на те, що найкращими міцнісними характеристиками відзначається реакційно-порошковий бетон четвертого складу (РПБ4). Введення тонкомеленого наповнювача у вигляді композиції зола + метаксаолін ( $275+75 \text{ кг/м}^3$ ) виявилось більш ефективним у порівнянні з меленим кварцовим піском, шлаком і золою. Середнє значення міцності при стиску у віці 28 діб для бетону такого складу складало майже 102 МПа а міцності при згині – понад 16 МПа (рис. 2.18).



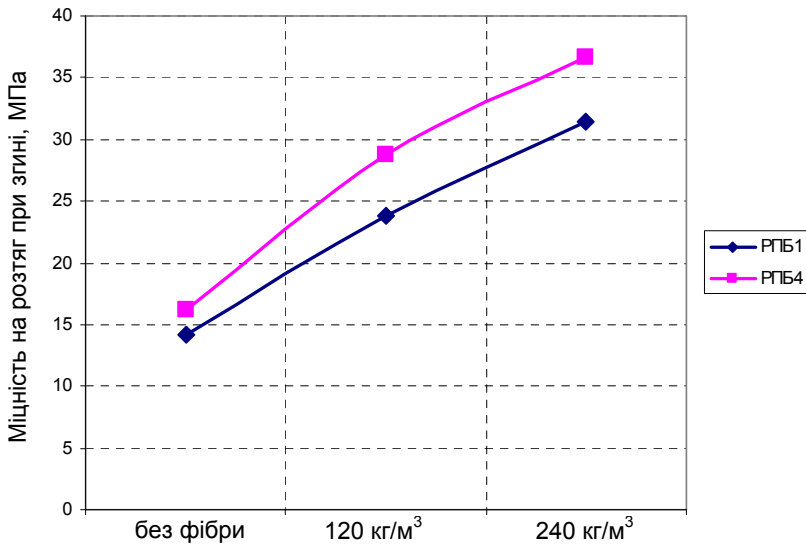
**Рис. 2.18.** Вплив виду та складу реакційно-порошкових бетонів на їх міцнісні властивості у віці 28 діб

При цьому характерно, що склад бетонної суміші із золою та метаксаоліном у порівнянні зі складом лише із золою (РПБ4 і РПБ3) характеризувався меншою водопотребою і витратою суперпластифікатора та, відповідно, водо-цементним відношенням. Суміші на РПБ4 характеризувалися кращою легкоукладальністю а випробувані зразки візуально містили меншу кількість пор. Значення В/Ц знаходилось в межах 0,27...0,29, а водо-тверде відношення – 0,087...0,093.

Для всіх складів реакційно-порошкових бетонів співвідношення  $f_{cm}/f_{c,tf}$ , що визначає дуктильний (пластичний) характер руйнування зразків [1] складає в середньому 6,5 (табл. 2.9), тоді як для високоміцних дрібнозернистих бетонів цей показник знаходиться в межах 10...11.

Відношення показника питомої ефективності використання цементу складає (по міцності у віці 28 діб) 43...49 кг/МПа міцності на розтяг при згині та 7...7.5 по міцності при стиску.

Введення фібри до складу реакційно-порошкових бетонів приводить до суттєвого зростання міцності на розтяг при згині (рис. 2.19).

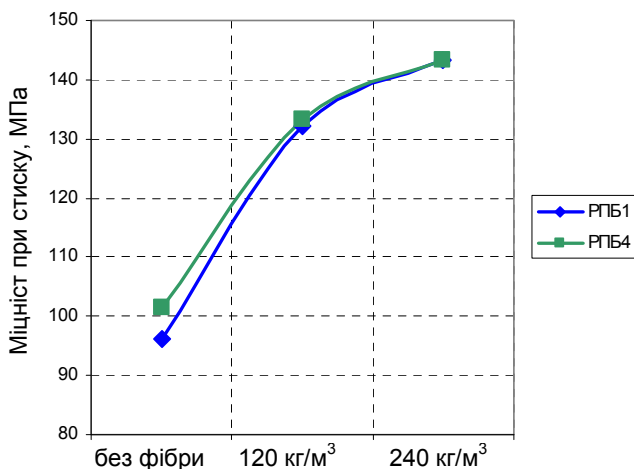


**Рис. 2.19.** Зростання міцності на розтяг при згині у віці 28 діб реакційно-порошкових фібробетонів при різному вмісті фібри порівняно із базовими складами

При вмісті сталевий мікрофібри в кількості  $120 \text{ кг/м}^3$  ( $\mu = 1,54\%$ ) досягається зростання міцності на розтяг при згині у віці 28 діб близько 70% залежно від складу РПБ, а при вмісті  $240 \text{ кг/м}^3$  ( $\mu = 3,08\%$ )  $f_{c,tf}$  зростає більше ніж у 2,2 рази.

Відомо, що міцність при стиску звичайних фібробетонів при використанні макрофібри (діаметром  $0,8...1 \text{ мм}$  і більше та довжиною понад  $40...50 \text{ мм}$ ) збільшується зазвичай несуттєво порівняно із аналогічними складами бетонів без фібри [10]. В нашому випадку зафіксований значний ріст  $f_{cm}$ . При витраті

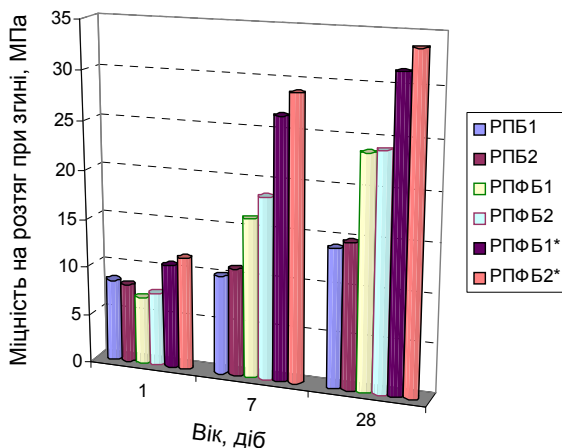
сталевій мікрофібри 120 кг/м<sup>3</sup> це зростання складо 30...35% а при витраті 240 кг/м<sup>3</sup> – 40...50% залежно від складу РПБ (рис. 2.20). Очевидно, що за рахунок оптимальної дисперсно-зернистої структури РПБ, відсутності крупного заповнювача та зменшення геометричних параметрів сталевій фібри вдається досягнути суттєвого збільшення зчеплення фібри з бетонною матрицею та створити своєрідний «каркас» в тілі бетону. Це, в свою чергу, позитивно впливає не лише на міцність на розтяг, а і на міцність при стиску.



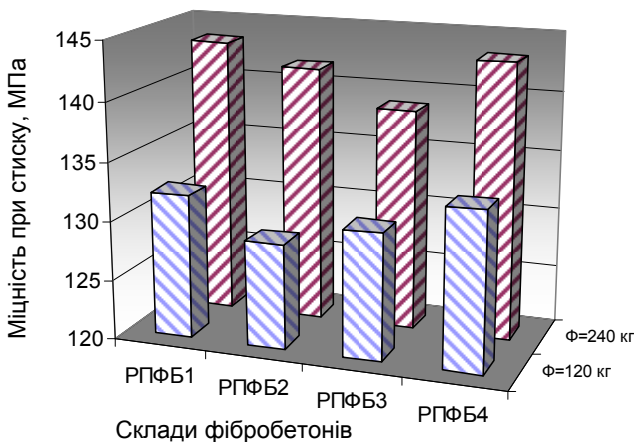
**Рис. 2.20.** Зростання міцності при стиску у віці 28 діб реакційно-порошкових фібробетонів при різному вмісті фібри порівняно із базовими складами

Варто відзначити, що в 1 добу зразки РПФБ мали міцність на розтяг при згині, що не суттєво відрізнялася від міцності зразків РПБ, а в деяких випадках навіть нижчу за контрольні склади без фібри (рис. 2.21). Очевидно, це можна пояснити слабшою адгезією розчинової частини до фібри у ранні строки твердіння. Вже у віці 7 діб спостерігається суттєве наростання значень  $f_{c,tf}$ .

Що стосується впливу на міцнісні показники РПФБ складу бетону, необхідно відзначити, що міцність при стиску змінювалась мало, залежно від вмісту активного наповнювача (рис. 2.22).



**Рис. 2.21.** Кінетика росту міцності на розтяг при згині реакційно-порошкових фібробетонів  
\* - витрата фібри 240 кг/м<sup>3</sup>

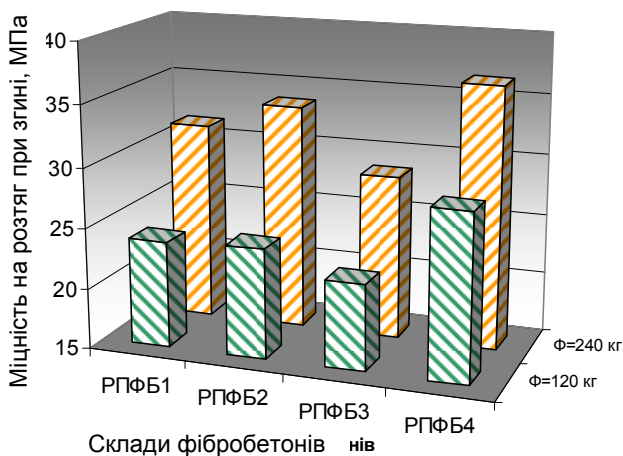


**Рис. 2.22.** Вплив виду та складу реакційно-порошкових фібробетонів на міцність при стиску у віці 28 діб при різній витраті фібри

Найбільші значення  $f_{ct}$  як і у випадку РПБ показали зразки на складі РПФБ4 (метакаолін + зола). Коливання міцності залежно від складу склали в середньому 4...5%. Збільшення вмісту фібри з 120 до 240 кг/м<sup>3</sup> дає зростання міцності при стиску 6...10%, що свідчить, як було зазначено раніше про досягнення певного оптимального значення вмісту дисперсного армування, яке знаходиться в області 200...220 кг/м<sup>3</sup>.

Зростання вмісту фібри приводить до певного зниження легкоукладальності, що потребувало корегування витрати води та добавки суперпластифікатора. Помічено, що при високому вмісті фібри та інтенсивному перемішуванні необхідно враховувати сильну механічну взаємодію сталевих волокон з диспергованими частинками цементу, що приводить до згущення суміші із зменшенням текучості і ускладнень формування зразків.

Міцність на розтяг при згині також залежить від складу РПБ схожим чином (рис. 2.23).



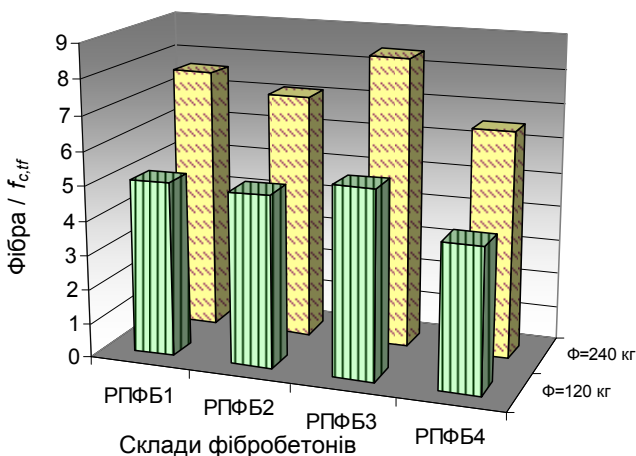
**Рис. 2.23.** Вплив виду та складу реакційно-порошкових фібробетонів на міцність на розтяг при згині у віці 28 діб при різних витраті фібри

Найбільші значення  $f_{c,tf}$  показали зразки бетону РПФБ4 (метакаолін + зола). Коливання міцності при згині залежно від складу зафіксовані значно суттєвіші у порівнянні із міцністю при стиску. Вони склали в середньому 25...30%. Збільшення вмісту фібри з 120 до 240 кг/м<sup>3</sup> дає зростання  $f_{c,tf}$  в 20...25%.

Співвідношення  $f_{cm}/f_{c,tf}$  для РПФБ при вмісті фібри 1,54% об. складає 4,6...5,9 (табл. 2.10), а при вмісті 3,08% – 3,9...4,8 (табл. 2.11) порівняно із 6,5 – для РПБ. Таким чином, роль фібри у збільшенні дуктильності зразків РПФБ є безперечною.

Відношення показника питомої ефективності використання цементу складає по міцності на розтяг при згині у віці 28 діб 24...31 кг/МПа ( $\mu = 1,54\%$ ) та 19...24 кг/МПа ( $\mu = 3,08\%$ ), що майже в два рази нижче ніж для неармованих РПБ. Цей же показник для міцності при стиску складає 3,9...5,9 кг/МПа і перевищує аналогічний для РПБ в 1,3...1,5 рази.

На рис. 2.24 наведено значення цього показника відношення витрати фібри до міцності на розтяг при згині РП+Б.



**Рис. 2.24.** Відношення витрати фібри до міцності на розтяг при згині реакційно-порошкових фібробетонів



Як видно, збільшення витрати фібри на 1 м<sup>3</sup> бетону не приводить до пропорційного зростання величини питомих витрат фібри на одиницю міцності фібробетону. Для міцності на розтяг при згині збільшення об'ємного вмісту фібри вдвічі збільшує питому витрату лише в 1,5...1,6 рази.

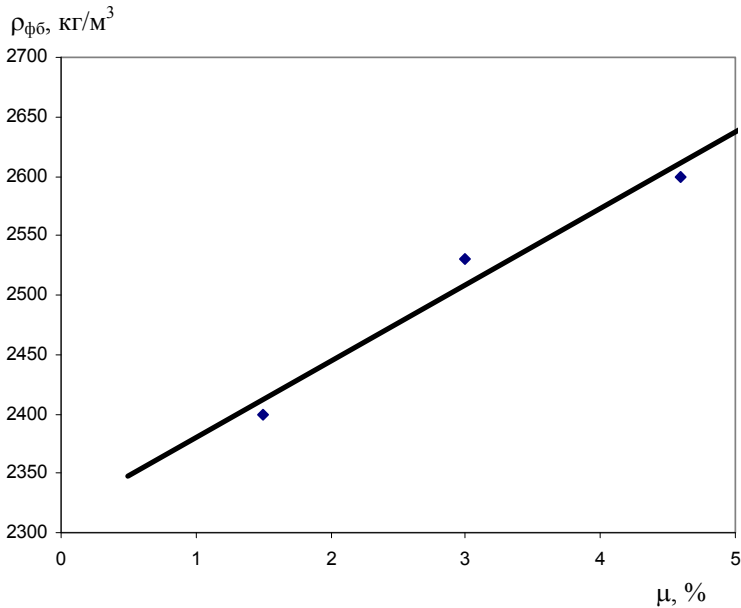
Густина фібробетону  $\rho_{\text{фб}}$  зі сталевую фіброю повинна зростати зі збільшенням вмісту фібри та її густини (рис. 2.25).

Якщо маса фібробетонної суміші  $M_{\text{фб}}$  складається з маси бетонної суміші  $M_b$  і маси фібри, то вираз може бути записаний у вигляді:

$$M_{\text{фб}} = M_b + \mu \cdot \rho_{\text{ф}}, \quad (2.10)$$

де  $\mu$  – об'ємна ступінь дисперсного армування бетону в долях одиниці;

$\rho_{\text{ф}}$  – істинна густина фібри, кг/м<sup>3</sup>.



**Рис. 2.25.** Залежність густини фібробетону від об'ємного ступеня дисперсного армування

Звідси маса бетонної суміші без фібри буде рівна:

$$M_b = M_{fb} - \mu \cdot \rho_f, \quad (2.11)$$

Об'єм бетону  $V_b$  буде рівний:

$$V_b = V_{fb} - \mu \cdot V_{fb} = V_{fb} \cdot (1 - \mu). \quad (2.12)$$

Тоді густина бетону у фібробетоні:

$$\rho_b = \frac{M_{fb} - \mu \cdot \rho_f}{V_{fb} \cdot (1 - \mu)}, \quad (2.13)$$

де  $V_{fb}$  – об'єм фібробетону, рівний 1000 л.

Для фібробетону зі сталеву фібру  $\rho_b$  буде складати:

$$\rho_b = \frac{M_{fb} - \mu \cdot 7800}{1000 \cdot (1 - \mu)}. \quad (2.14)$$

Використовуючи формулу (2.14), можна за експериментальними значеннями густини фібробетону встановити фактичну густину бетонної матриці і повітрявтягувальну функцію мікрофібри.

### **2.2.1. Реакційно-порошкові фібробетони із композиційним дисперсним армуванням**

Ступінь позитивних змін властивостей бетону при його дисперсному армуванні і характеристик конструкцій на його основі головним чином визначається видом і властивостями використовуваних волокон, співвідношенням і ступенем взаємодії між ними. Тісний взаємозв'язок армуючих волокон з бетонною матрицею, крім її власної активності, забезпечується величиною поверхні розділу, яка, в свою чергу, залежить від ступеня насичення бетону волокнами, їх геометричних характеристик і поверхневої енергії [15].

З теоретичних передумов, можна припустити, що найбільшого позитивного ефекту в плані покращення структури і властивостей фібробетонів можна досягти в результаті композиційного дисперсного армування при оптимальному поєднанні двох і більше видів фібр різного складу, з різними розмірами, міцністю і пружно-пластичними характеристиками. Метою композиційного армування є створення такого

матеріалу, який зберігаючи позитивні особливості, виключав би недоліки, що мають місце у варіанті моноармування.

Перевагами композиційного дисперсного армування (поліармування) можуть бути:

- забезпечення більшої однорідності структури фібробетону, що в свою чергу створює передумови для досягнення більших значень міцності, ніж у випадку моноармування;
- уникнення або суттєвого зменшення розшарування фібробетонної суміші в процесі її приготування, транспортування та укладання;
- цілеспрямоване регулювання комплексу фізико-механічних властивостей фібробетону в більш широких межах, ніж при моноармуванні;
- можливість покращення показників довговічності та експлуатаційних характеристик фібробетону.

Проведений літературний огляд показує, що питання використання композиційного дисперсного армування для покращення властивостей фібробетонів та сумішей вивчалось недостатньо. Окремі дослідження проведені за цим напрямком дозволяють зробити висновок про перспективність використання полідисперсного армування [16-18].

Для визначення можливості одержання полідисперсно армованого РПФБ з використанням сталеві мікрофібри та базальтової (поліпропіленової) фібри із забезпеченням рівномірності їх розподілу в одержуваній структурі, були виготовлені серії поліармованих фібробетонних зразків. За базовий був прийнятий склад реакційно-порошкового фібробетону, що відповідає РПБ4 (табл. 2.9). В/Ц суміші складало 0,27. Необхідна рухомість суміші 23...25 см досягалася за рахунок введення добавки суперпластифікатора Dynamon SP3.

Використовували сталеву мікрофібру Ф5 в кількостях 120 і 200 кг/м<sup>3</sup> бетону. Для отримання поліармованої композиції використовували базальтову фібру довжиною 12 і 24 мм та поліпропіленову фібру довжиною 12 та 18 мм. При цьому вміст

базальтової фібри змінювався в межах від 0 до 6 кг/м<sup>3</sup>, а поліпропіленової – від 0 до 2 кг/м<sup>3</sup>.

Приготування фібробетону із композиційним дисперсним армуванням проводили в такій послідовності. У розчин пластифікатора вводили базальтову або поліпропіленову фібру і перемішували в лабораторному змішувачі з вертикальним валом протягом 40-50 с. У розпушене таким чином волокно додавали цемент і знову здійснювали перемішування до отримання однорідної суспензії. Потім в отриману суспензію додавали заповнювач відповідно до прийнятого дозування. Нарешті на останньому етапі, при безперервному перемішуванні суміші, вводилася необхідна кількість просіяної крізь сито сталеві фібри. Така технологія дозволила виключити комкування волокон і забезпечити необхідну однорідність композиційного дисперсноармованого бетону.

### **2.2.2. Вплив вмісту та співвідношення металевої та неметалевої фібри на міцність РПФБ**

В табл. 2.12 представлені результати визначення міцності РПФБ на основі сталеві та базальтової фібри при різних комбінаціях полідисперсного армування.

Як слідує з даних табл. 2.12, введення базальтової фібри позитивно впливає перш за все на міцність на розтяг при згині. Міцність  $f_{c,tf}^7$  РПФБ контрольного складу при витраті сталеві фібри 120 кг/м<sup>3</sup> становила 21,6 МПа, а максимальне її значення для композиційного фібробетону з базальтовою фіброю становило 26,0 МПа (при витраті 4 кг/м<sup>3</sup> та довжині волокон 12 мм). Середнє збільшення міцності на розтяг при згині в залежності від довжини волокна та його вмісту склало від 7 до 20%.

При витраті сталеві фібри 200 кг/м<sup>3</sup> міцність  $f_{c,tf}^7$  фібробетону контрольного складу склала 27,9 МПа, а максимальне її значення для композиційного фібробетону становило 31,3 МПа (при витраті базальтової фібри 4 кг/м<sup>3</sup> та довжині волокон 12 мм). Таким чином, максимальне зростання міцності склало 12%. Менше зростання міцності в цьому випадку очевидно можна пояснити досягненням значень

загального об'ємного вмісту волокон, що відповідають максимально можливому вмісту.

Таблиця 2.12

Міцність фібробетонних зразків з різним вмістом та співвідношенням сталевोї та базальтової фібри

Витрата сталевої фібри, кг/м <sup>3</sup>	Витрата базальтової фібри, кг/м <sup>3</sup>	Загальний вміст волокон за об'ємом, $\mu$ , %	Частка базальтової фібри в загальному об'ємі армування $n$	Міцність при стиску у віці 7 діб $f_{cm}^7$ , МПа	Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб $f_{c,tf}^7$ , МПа
Базальтова фібра ( $l = 12$ мм)					
120	0	1,54	0,00	96,8	21,6
	2	1,61	0,05	97,8	25,4
	4	1,69	0,09	100,7	26,0
	6	1,76	0,13	99,3	21,4
200	0	2,56	0,00	113,6	27,9
	2	2,64	0,03	113,1	31,1
	4	2,72	0,06	117,6	31,3
	6	2,79	0,08	111,2	24,2
Базальтова фібра ( $l = 24$ мм)					
120	0	1,54	0,00	96,8	21,6
	2	1,61	0,05	100,8	23,1
	4	1,69	0,09	94,7	20,2
	6	1,76	0,13	94,2	13,7
200	0	2,56	0,00	113,6	27,9
	2	2,64	0,03	116,6	28,2
	4	2,72	0,06	107,3	25,1
	6	2,79	0,08	104,9	16,6

Використання базальтової фібри з довжиною волокон 24 мм в цілому показало гірші результати. Зафіксоване збільшення  $f_{c,tf}^7$  на 7% лише при вмісті цих волокон 2 кг/м<sup>3</sup> (при витраті сталевої фібри 120 кг/м<sup>3</sup>). При збільшенні вмісту

базальтової фібри зафіксоване максимальне падіння міцності на 40%.

Зменшення міцності фібробетону, що спостерігається при збільшенні довжини використовуваних волокон обумовлено, ймовірно, зменшенням процентного вмісту волокна в площині перетину руйнування і зниженням міцності зчеплення на границі «волокно - цементна матриця». Крім того волокна довжиною 24 мм гірше розподіляються в масиві фібробетону, що позначається в подальшому на особливостях його структури.

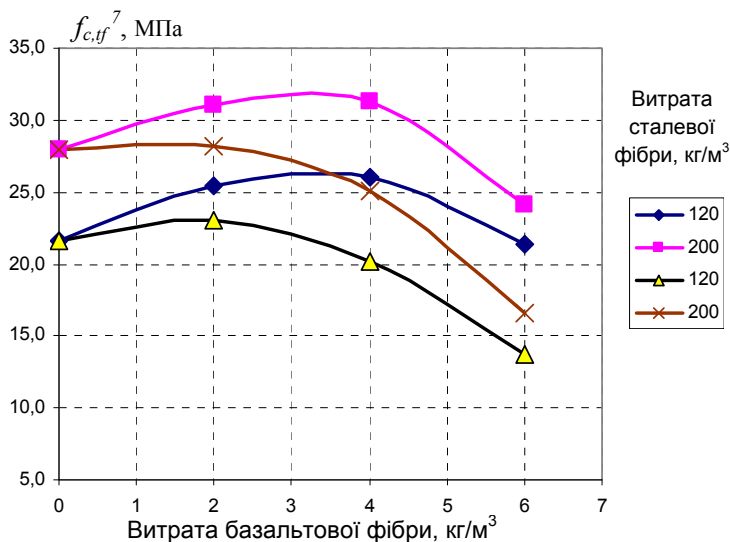
Аналіз характеру руйнування композиційного РПФБ, армованого базальтовими волокнами довжиною 12 мм, свідчить, що руйнування бетону відбувається з досить хорошою участю волокон в роботі цементної матриці.

Розглядаючи вплив частки базальтової фібри в загальному об'ємі армування (рис. 2.26) варто відзначити, що її оптимальний вміст складає  $2 \text{ кг/м}^3$  ( $n = 0.07$ ) при витраті сталеві фібри  $120 \text{ кг/м}^3$  і  $2\text{-}4 \text{ кг/м}^3$  ( $n = 0.05\text{...}0.09$ ) при витраті сталеві фібри  $200 \text{ кг/м}^3$ . Подальше збільшення вмісту базальтової фібри очевидно призводить до збільшення питомої поверхні дисперсної арматури, що в свою чергу обумовлює збільшення кількості води, необхідної для отримання бетонних сумішей із заданою рухомістю.

Міцність при стиску композиційних РПФБ, очікувано мало залежить від вмісту базальтової фібри. Для різних композицій зафіксоване коливання значення міцності в середньому в межах  $2\text{...}3\%$ .

Для порівняння результатів, одержаних при використанні базальтової фібри були проведені досліди з використанням поліпропіленової фібри, яка входить до групи низькомодульних волокон. Як видно з результатів, наведених в табл. 2.13, при різних комбінаціях витрат сталеві та поліпропіленові фібри в цілому спостерігається погіршення значень міцності на розтяг при згині у порівнянні із контрольними зразками. Лише при використанні поліпропіленові фібри довжиною 12 мм та її вмісті  $1 \text{ кг/м}^3$  зниження міцності  $f_{c,tf}$  <sup>7</sup> композиційного РПФБ майже не спостерігалось. В усіх інших випадках введення до складу композиції поліпропіленові фібри погіршувало

значення міцності на розтяг при згині в середньому від 5 до 40%.



**Рис. 2.26.** Залежності міцності на розтяг при згині полідисперсно армованих РПФБ

Міцність при стиску практично не змінювалась при різних варіантах композицій у досліджуваних межах.

Аналізуючи отримані результати, наведені в табл. 2.12 і 2.13 можна зробити висновок, що використання в якості компонента композиційного армування поліпропіленової фібри дає дещо гірший ефект у порівнянні з базальтовими волокнами. Це в першу чергу можна пов'язати із гіршим розподіленням в структурі бетону поліпропіленових волокон, що не сприяє рівномірному розподіленню сталевих волокон. Дослідження структури зруйнованих зразків фібробетонів з використанням поліпропіленової фібри показало на ознаки неоднорідності структури, в окремих зонах спостерігались комки волокон, такі суміші при приготуванні та формуванні були більше схильні до розшарування. Також огляд характеру руйнування зразків

композиційного РПФБ із поліпропіленовою фіброю вказував на гіршу адгезію поліпропілену з цементною матрицею, внаслідок чого при руйнуванні зразків спостерігалось висмикування окремих волокон.

Таблиця 2.13

Міцність зразків РПФБ з різним вмістом та співвідношенням сталевोї та поліпропіленової фібри

Витрата сталевої фібри, кг/м <sup>3</sup>	Витрата поліпропіленової фібри, кг/м <sup>3</sup>	Загальний вміст волокон за об'ємом, $\mu$ , %	Частка поліпропіленової фібри в загальному об'ємі армування $n$	Міцність при стиску у віці 7 діб $f_{cm}^7$ , МПа	Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб $f_{c,tf}^7$ , МПа
Поліпропіленова фібра ( $l = 12$ мм)					
80	0	1,03	0,00	96,8	21,6
	1	1,14	0,10	96,3	21,2
	2	1,25	0,18	96,9	19,7
120	0	1,54	0,00	100,2	27,9
	1	1,65	0,07	102,3	26,7
	2	1,76	0,13	101,0	25,4
Поліпропіленова фібра ( $l = 18$ мм)					
80	0	1,03	0,00	96,8	21,6
	1	1,14	0,03	94,8	20,6
	2	1,25	0,06	94,4	18,1
120	0	1,54	0,00	100,2	27,9
	1	1,65	0,07	101,0	22,3
	2	1,76	0,13	98,9	16,4

Всі вказані вище недоліки були практично відсутні у випадку використання базальтової фібри для композиційного дисперсного армування. Очевидно, що базальтова фібра, яка за густиною та пружними характеристиками ближча до бетонної матриці ніж поліпропіленова, при оптимальній витраті та співвідношенні із сталеву фіброю утворює своєрідний несучий каркас, який утримує сталеву фібру, попереджає розшарування



суміші та сприяє рівномірному розподіленню дисперсної арматури в структурі бетону. Все це, відповідно, позначається на міцнісних характеристиках фібробетонів.

### **2.2.3. Вплив факторів складу на міцність РПФБ з композиційним дисперсним армуванням**

Попередні дослідження підтверджують гіпотезу про можливість покращення структури і, відповідно, властивостей реакційно-порошкових фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням при використанні базальтової фібри.

З метою детального вивчення цього питання на наступному етапі досліджували комплексний вплив на міцнісні характеристики РПФБ з композиційним дисперсним армуванням витрати цементу, водоцементного відношення а також вмісту та об'ємного співвідношення сталевोї та базальтової фібри. Для цього був реалізований трьохрівневий чотирьохфакторний план експерименту  $B_4$  [12].

За основу був прийнятий склад реакційно-порошкового фібробетону, що відповідає РПБ4 (табл. 2.11). Необхідна рухомість суміші ( $OK = 23...25$  см) досягалася за рахунок введення добавки суперпластифікатора Дунатон SP3. Використовували сталеву мікрофібру Ф5 та базальтову фібру довжиною 12 мм.

Умови планування експерименту та результати досліджень наведені в табл. 2.14 та табл. 2.15 відповідно.

Після проведення обробки та статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі міцності РПФБ з композиційним дисперсним армуванням на стиск та розтяг при згині у вигляді поліноміальних рівнянь регресії. Результати обробки та статистичного аналізу експериментальних даних наведені в табл. 2.16.

Використовуючи моделі, наведені в табл. 2.16 були побудовані графічні залежності вихідних параметрів від двох факторів впливу (рис. 2.27). При цьому два інших фактори, не представлені на кожному з графіків, були зафіксовані на нульовому рівні.

Таблиця 2.14

Умови планування експерименту при визначенні параметрів складів РПФБ з композиційним дисперсним армуванням

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Код	Натуральний вид	-1	0	+1	
1	$X_1$	Витрата цементу, кг/м <sup>3</sup> (Ц)	500	600	700	100
2	$X_2$	В/Ц	0,25	0,3	0,35	0,05
3	$X_3$	Витрата сталеві фібри, кг/м <sup>3</sup> (СФ)	120	180	240	60
4	$X_4$	Витрата базальтової фібри, кг/м <sup>3</sup> (БФ)	0	2	4	2

Аналізуючи отримані експериментально-статистичні моделі міцності при стиску, можна відзначити, що очікувано найбільш суттєвим фактором, який на неї впливає є водоцементне відношення ( $x_2$ ), зменшення якого від +1 до -1 (від В/Ц=0,4 до В/Ц=0,3) призводить до збільшення міцності в середньому на 40%. Причому таке збільшення спостерігається при різних витратах цементу і у різні строки випробувань. Вплив даного фактору в обраному діапазоні його варіювання носить лінійний характер і він складає близько 70% від впливу усіх факторів. Збільшення витрати цементу ( $x_1$ ) у варійованих межах збільшує міцність при стиску на 8...20%. Зміна вмісту сталеві фібри ( $x_3$ ) при постійному водоцементному відношенні суттєво не впливає на міцність досліджуваних бетонів. В той же час, базальтова фібри ( $x_4$ ) дозволяє дещо підвищити міцність РПФБ, особливо у віці 28 діб. На це вказують також і значення лінійних коефіцієнтів у рівняннях регресії (-0,15 для  $x_3$  і 1,5 для  $x_4$ ). Таку відмінність у впливі на міцність РПФБ сталеві і базальтової фібри можна пояснити більшою питомою поверхнею останньої та кращим її зчепленням із бетонною матрицею.

Таблиця 2.15

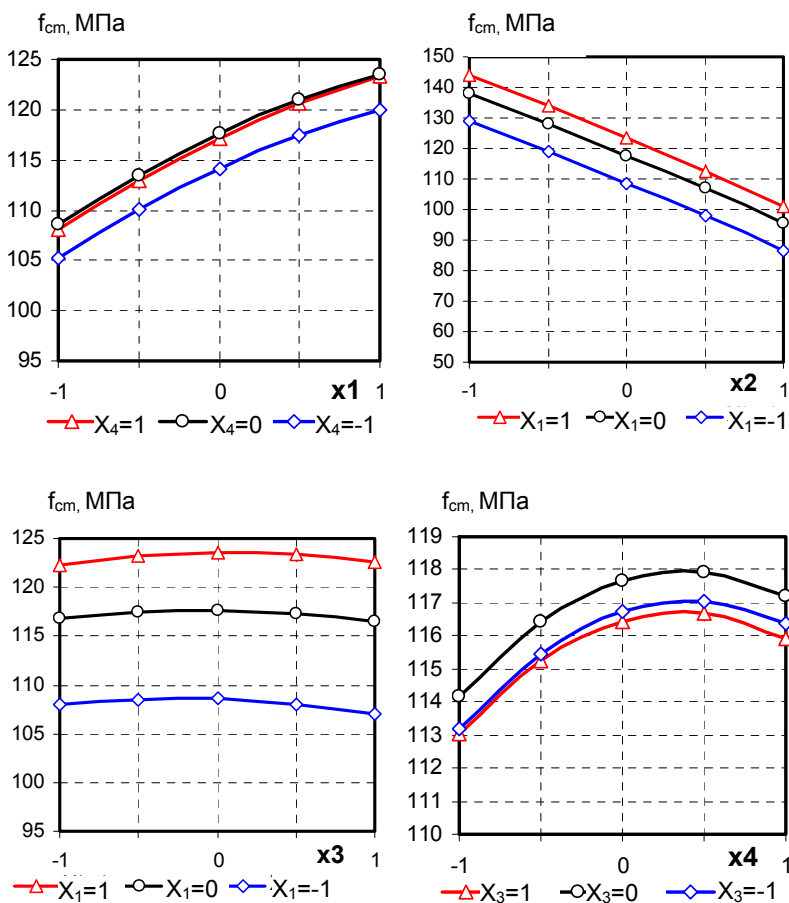
Експериментальні результати по визначенню параметрів складів РПФБ з композиційним дисперсним армуванням

№ т. плану	Кодовані значення факторів				Витрати компонентів, кг/м <sup>3</sup>							В/Ц	СП, %	$f_{cm}^1$ , МПа	$f_{c,ff}^1$ , МПа	$f_{cm}^7$ , МПа	$f_{c,ff}^7$ , МПа	$f_{cm}^{28}$ , МПа	$f_{c,ff}^{28}$ , МПа
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	Ц	З	МТК	В	П	СФ	БФ								
1	+	+	+	+	700	275	75	245	1210	240	4	0,35	0,39	32,88	9,23	66,24	18,46	100,8	31,7
2	+	+	+	-	700	275	75	245	1210	240	0	0,35	0,31	34,32	8,06	65,64	14,43	97,4	26,2
3	+	+	-	+	700	275	75	245	1210	120	4	0,35	0,20	36,24	8,19	68,52	16,12	101,0	23,0
4	+	+	-	-	700	275	75	245	1210	120	0	0,35	0,08	33,84	6,5	66,96	13	99,2	17,1
5	+	-	+	+	700	275	75	175	1210	240	4	0,25	1,83	48,6	12,22	92,28	23,27	144,5	39,7
6	+	-	+	-	700	275	75	175	1210	240	0	0,25	1,71	49,08	11,44	93,72	20,67	142,7	37,8
7	+	-	-	+	700	275	75	175	1210	120	4	0,25	1,35	49,92	11,57	144,36	23,79	144,6	33,8
8	+	-	-	-	700	275	75	175	1210	120	0	0,25	1,24	48,36	10,01	95,64	20,15	138,5	28,9
9	-	+	+	+	500	320	75	175	1350	240	4	0,35	0,68	28,92	9,36	59,04	19,76	86,0	29,5
10	-	+	+	-	500	320	75	175	1350	240	0	0,35	0,62	28,56	8,58	58,92	18,07	80,7	28,3
11	-	+	-	+	500	320	75	175	1350	120	4	0,35	0,40	29,4	7,93	59,52	14,04	85,7	23,2
12	-	+	-	-	500	320	75	175	1350	120	0	0,35	0,31	27,6	6,76	57,6	10,66	83,7	18,1
13	-	-	+	+	500	320	75	125	1350	240	4	0,25	1,77	40,68	10,79	83,88	21,97	126,9	37,6
14	-	-	+	-	500	320	75	125	1350	240	0	0,25	1,63	40,92	9,75	85,2	19,76	125,9	32,3
15	-	-	-	+	500	320	75	125	1350	120	4	0,25	0,53	41,16	9,36	86,64	16,64	128,0	26,0
16	-	-	-	-	500	320	75	125	1350	120	0	0,25	1,55	40,56	8,19	84,48	13,39	125,0	22,4
17	+	0	0	0	700	275	75	210	1210	180	2	0,3	0,74	38,76	10,79	80,52	21,97	119,9	36,5
18	-	0	0	0	500	320	75	150	1350	180	2	0,3	0,50	35,88	9,88	77,04	20,28	112,7	34,8
19	0	+	0	0	600	290	75	210	1280	180	2	0,35	0,51	29,04	10,01	63,6	19,11	97,5	31,0
20	0	-	0	0	600	290	75	150	1280	180	2	0,25	0,87	47,4	11,44	93,48	22,62	136,4	38,2
21	0	0	+	0	600	290	75	180	1280	240	2	0,3	0,53	38,04	9,75	81,72	18,46	115,8	31,2
22	0	0	-	0	600	290	75	180	1280	120	2	0,3	0,20	38,76	8,84	74,76	14,95	117,8	23,0
23	0	0	0	+	600	290	75	180	1280	180	4	0,3	0,42	38,4	11,31	78,24	20,41	117,2	33,3
24	0	0	0	-	600	290	75	180	1280	180	0	0,3	0,31	37,92	9,75	79,2	18,98	114,6	32,5

Таблиця 2.16

Математичні моделі міцнісних параметрів РПФБ з  
композиційним дисперсним армуванням

Вихідний параметр		Математичні моделі
Міцність при стиску у віці:	1 доба	$f_{cm}^1 = 32,7 + 2,7 \cdot X_1 - 5,8 \cdot X_2 - 0,2 \cdot X_3 + 0,2 \cdot X_4 -$ $0,6 \cdot X_1^2 + 0,1 \cdot X_2^2 + 0,3 \cdot X_3^2 - 0,5 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,3 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,4 \cdot X_3 \cdot X_4$ $(2.15)$
	7 діб	$f_{cm}^7 = 66,1 + 3,6 \cdot X_1 - 11,3 \cdot X_2 - 0,2 \cdot X_3 + 0,2 \cdot X_4 - 0,7 \cdot X_2^2 - 2,4 \cdot X_4^2 -$ $-0,4 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,5 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,2 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,3 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,4 \cdot X_3 \cdot X_4$ $(2.16)$
	28 діб	$f_{cm}^{28} = 117,6 + 7,5 \cdot X_1 - 21,3 \cdot X_2 - 0,15 \cdot X_3 + 1,5 \cdot X_4 - 1,58 \cdot X_1^2 -$ $0,91 \cdot X_2^2 - 1,06 \cdot X_3^2 - 1,96 \cdot X_4^2 - 0,1 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,2 \cdot X_1 \cdot X_3 -$ $0,35 \cdot X_2 \cdot X_3$ $(2.17)$
Міцність на розтяг при згині у віці:	1 доба	$f_{c,tf}^1 = 7,47 + 0,31 \cdot X_1 - 0,82 \cdot X_2 + 0,46 \cdot X_3 + 0,43 \cdot X_4 - 0,18 \cdot X_1^2 -$ $-0,33 \cdot X_3^2 + 0,12 \cdot X_4^2 - 0,36 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,1 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,1 \cdot X_3 \cdot X_4$ $(2.18)$
	7 діб	$f_{c,tf}^7 = 15,56 + 0,74 \cdot X_1 - 1,66 \cdot X_2 + 1,38 \cdot X_3 + 1,1 \cdot X_4 + 0,67 \cdot X_1^2 +$ $+0,47 \cdot X_2^2 - 1,43 \cdot X_3^2 - 0,43 \cdot X_4^2 - 0,8 \cdot X_1 \cdot X_2 -$ $X_1 \cdot X_3 + 0,14 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,25 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,14 \cdot X_3 \cdot X_4$ $(2.19)$
	28 діб	$f_{c,tf}^{28} = 33,91 + 1,27 \cdot X_1 -$ $3,85 \cdot X_2 + 4,42 \cdot X_3 + 1,92 \cdot X_4 + 1,66 \cdot X_1^2 + 0,62 \cdot X_2^2 -$ $-1,62 \cdot X_3^2 - 1,09 \cdot X_4^2 - 1,43 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,33 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,19 \cdot X_1 \cdot X_4$ $(2.20)$
Витрата Melflux 2651F		$CП = 0,38 - 0,008 \cdot X_1 - 0,50 \cdot X_2 + 0,20 \cdot X_3 - 0,01 \cdot X_4 -$ $0,24 \cdot X_1^2 + 0,31 \cdot X_2^2 - 0,01 \cdot X_3^2 - 0,01 \cdot X_4^2 - 0,11 \cdot X_1 \cdot X_2 -$ $0,03 \cdot X_1 \cdot X_3$ $(2.21)$



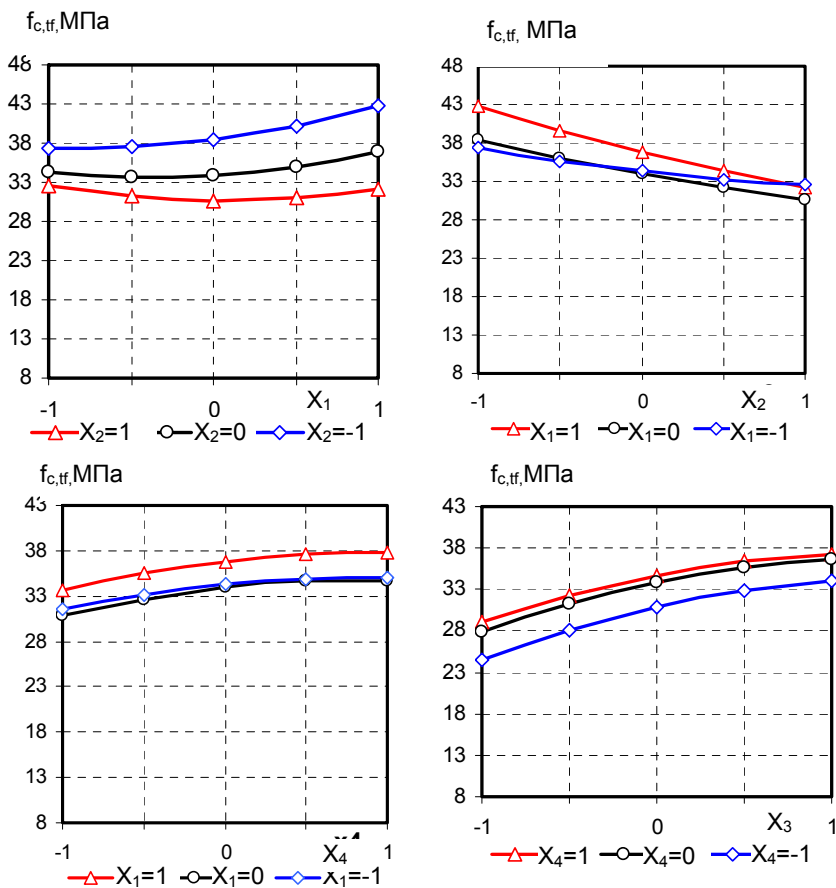
**Рис. 2.27.** Залежність міцності при стиску РПФБ з композиційним дисперсним армуванням у віці 28 діб від витрати цементу ( $X_1$ ), В/Ц ( $X_2$ ), витрат сталеві ( $X_3$ ) та базальтової фібри ( $X_4$ )

За впливом на міцність при стиску РПФБ з композиційним дисперсним армуванням досліджувані фактори можна розташувати в ряду:  $x_2 > x_1 > x_4 > x_3$ .

Характер залежностей міцності на розтяг при згині, що побудовані на основі відповідних моделей (табл. 2.16) суттєво відрізняється. Варто відзначити, що фактор вмісту сталеві фібри ( $x_3$ ), який відображає ступінь дисперсного армування РПФБ є одним з найбільш впливових на величину даного показника міцності. Причому максимальний вплив даного фактору проявляється у віці 28 діб (38% від впливу усіх факторів). Другим за ступенем впливу на міцність на розтяг при згині є фактор В/Ц (33%), а його вплив у ранньому віці навіть переважає вплив фактора вмісту сталеві фібри.

Вплив фактору вмісту сталеві фібри ( $x_3$ ) носить слабо виражений екстремальний характер, що видно як із відповідної графічної залежності (рис. 2.28), так і по квадратичному коефіцієнту у відповідному рівнянні регресії (табл. 2.16). Збільшення вмісту фібри від 120 ( $x_3=-1$ ) до 210 ( $x_3=0,5$ ) кг/м<sup>3</sup> призводить до збільшення міцності на розтяг при згині в середньому на 30...40 % залежно від значень інших факторів. Подальше ж збільшення кількості сталеві фібри суттєво не впливає на міцність РПФБ на розтяг при згині. Найменшим впливом на розглядуваний показник при постійному В/Ц відзначається фактор витрати цементу ( $x_1$ ), що має найменший лінійний коефіцієнт у рівнянні регресії. Порівняно високий коефіцієнт взаємодії факторів  $x_1$  та  $x_2$  вказує на суттєву залежність ступеня впливу кожного з них від зміни іншого і приводить до появи неоднозначних кривих на графіку (рис. 2.28).

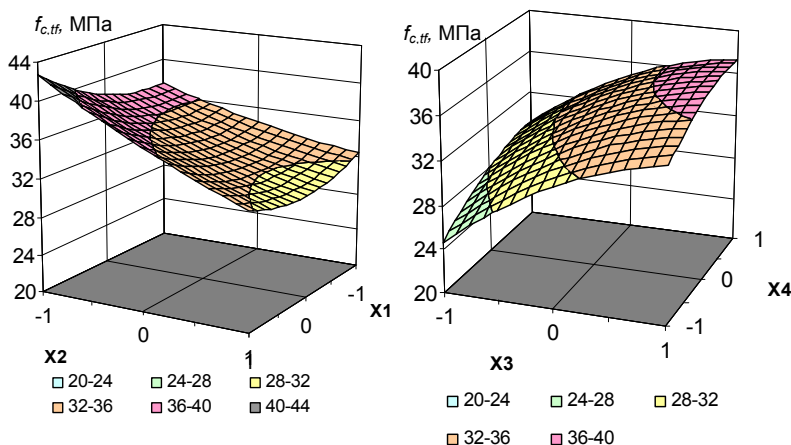
Стосовно впливу вмісту базальтової фібри ( $x_4$ ), як було зазначено раніше введення її до складу суміші в кількості до 4 кг/м<sup>3</sup> дозволяє збільшити міцність на розтяг при згині до 20% у порівнянні зі складами без її вмісту. Також можна відзначити високу ступінь впливу даного фактора на величину міцності у ранні строки твердіння, яка у віці 1 доба складає понад 20% і майже не поступається за силою впливу фактору вмісту сталеві фібри ( $x_3$ ).



**Рис. 2.28.** Залежність міцності на розтяг при згині РПФБ з композиційним дисперсним армуванням у віці 28 діб від витрати цементу ( $X_1$ ), В/Ц ( $X_2$ ) та витрат сталеві фібри ( $X_3$ ) та базальтової фібри ( $X_4$ )

В подальшому спостерігається зменшення величини впливу фактора  $x_4$  і відповідного зростання  $x_3$ . Аналіз поверхонь відгуку вихідного параметру  $f_{c,tf}^{28}$  (рис. 2.29) вказує на те, що з метою досягнення максимальних значень міцності на розтяг при стиску необхідно підтримувати значення фактору В/Ц ( $x_2$ ) на

нижньому рівні варіювання, а факторів витрат сталевोї ( $x_3$ ) та базальтової фібри ( $x_4$ ) на верхньому рівні. Також можна зробити висновок, що досягнення значень  $f_{c,tf}^{28} > 30$  МПа можна забезпечувати в широкому діапазоні витрат сталевої та базальтової фібри ( $x_3 = 0...1$ ;  $x_4 = -0,75...1$ ) – відповідно 180...240 кг/м<sup>3</sup> сталевої та 0,5...4 кг/м<sup>3</sup> базальтової фібри.

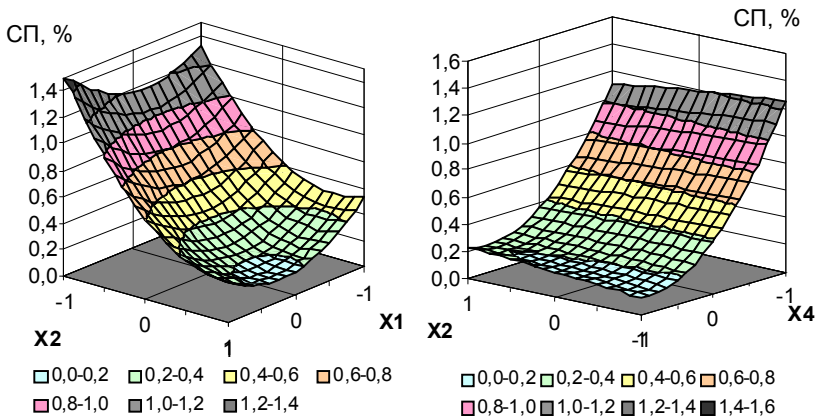


**Рис. 2.29.** Поверхні відгуку міцності на розтяг при згині РПФБ з композиційним дисперсним армуванням у віці 28 діб від витрати цементу ( $X_1$ ), В/Ц ( $X_2$ ) та витрат сталевोї фібри ( $X_3$ ) та базальтової фібри ( $X_4$ )

Аналіз моделі витрати суперпластифікатора та графічних залежностей (рис. 2.30) дозволяє відзначити найбільший вплив фактора В/Ц ( $x_2$ ). Значення його лінійного коефіцієнта у рівнянні регресії (табл. 2.16) суттєво перевищує значення коефіцієнтів для двох інших факторів. Збільшення витрати сталевої фібри ( $x_3$ ) та базальтової фібри ( $x_4$ ) у варійованих межах призводить до зростання витрати суперпластифікатора, що пояснюється потребою у забезпеченні необхідної легкоукладальності при потенційному збільшенні водопотреби. Зростання витрати цементу в межах від 500 ( $x_1 = -1$ ) до 600 кг/м<sup>3</sup> ( $x_1 = 0$ ) несуттєво впливає на витрату суперпластифікатора; при



подальшому збільшенні вмісту цементу ( $x_1 = 0 \dots 1$ ) спостерігається зростання вмісту СП в 2...2,5 рази.



**Рис. 2.30.** Поверхні відгуку витрати суперпластифікатора для фібробетонної суміші з композиційним дисперсним армуванням від витрати цементу ( $X_1$ ), В/Ц ( $X_2$ ) та витрат базальтової фібри ( $X_4$ )

Потрібно відзначити, що незважаючи на деяке збільшення водопотреби бетонної суміші при введенні базальтової фібри, що необхідно компенсувати збільшеною витратою суперпластифікатора, інші показники як суміші, так і затверділого РПФБ покращуються.

За результатами попередніх досліджень було встановлено оптимальний вміст сталеві фібри, що складає близько  $210 \text{ кг/м}^3$  ( $\mu = 2,7\%$ ). Подальше збільшення вмісту фібри призводило до зниження міцності, що було наслідком проявлення схильності до розшарування навіть при невеликих навантаженнях. При використанні композиційного дисперсного армування з використанням базальтової фібри стає можливою витрата сталеві фібри в кількості  $240 \text{ кг/м}^3$ , при цьому забезпечується однорідність структури та практично відсутнє розшарування а міцнісні показники такого фібробетону збільшуються на 10...20%.

### 2.3. Технологічні властивості фібробетонних сумішей

Численні експериментальні та теоретичні роботи, що стосуються фібробетонів, в т.ч. реакційно-порошкових фібробетонів, спрямовані переважно на визначення їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей. Відзначається також вплив легкоукладальності фібробетонної суміші [19; 20; 21; 22] та її зв'язок із пористістю [23]. Аналіз цих та інших робіт вказує на недостатність досліджень технологічних властивостей фібробетонних сумішей, зокрема таких, як водопотреба, розшаровуваність, збережуваність рухомості у часі тощо.

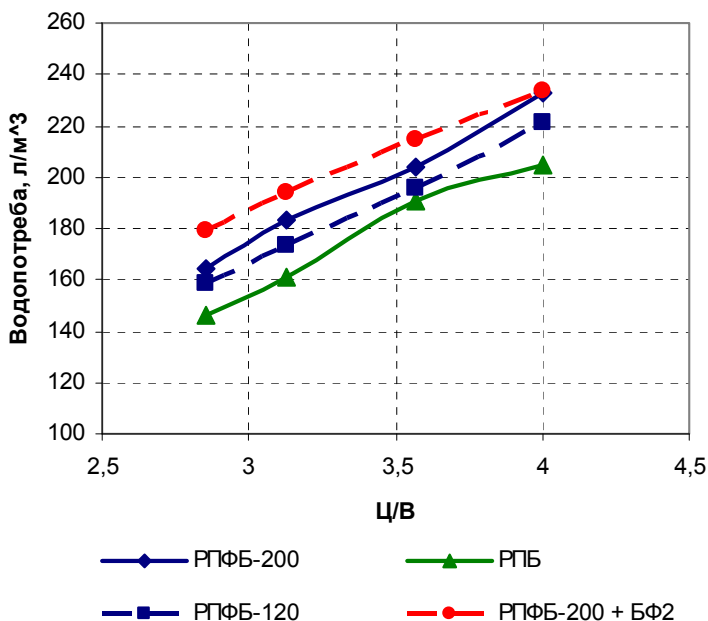
**Водопотреба і легкоукладальність.** Водопотреба і легкоукладальність – найважливіші взаємопов'язані між собою технологічні властивості бетонних сумішей, що визначають як здатність їх до ущільнення, так і, значною мірою, властивості затверділого бетону.

Для встановлення впливу Ц/В на водопотребу досліді проводили на реакційно-порошкових бетонах та фібробетонах. За основу прийнятий склад РПБ4 (табл. 2.9).

Для РПФБ витрату сталеві мікрофібри змінювали від  $120 \text{ кг/м}^3$  ( $\mu = 1,54\%$ ) до  $200 \text{ кг/м}^3$  ( $\mu = 2,56\%$ ). Для РПФБ з композиційним дисперсним армуванням при вмісті сталеві мікрофібри  $200 \text{ кг/м}^3$  витрата базальтової фібри змінювалась від 2 до  $4 \text{ кг/м}^3$  (в першому випадку сумарна об'ємна витрата склала  $\mu = 2,64\%$ ,  $n = 0,029$ , в другому –  $\mu = 2,72\%$ ,  $n = 0,059$ ). В бетонні суміші вводили суперпластифікатори полікарбосилатного типу Melflux 2651f та поліакрилатного Dynamon SP3.

На першому етапі бетонні суміші готували при чотирьох різних значеннях Ц/В. Рухомість сумішей витримували в межах 23...25 см.

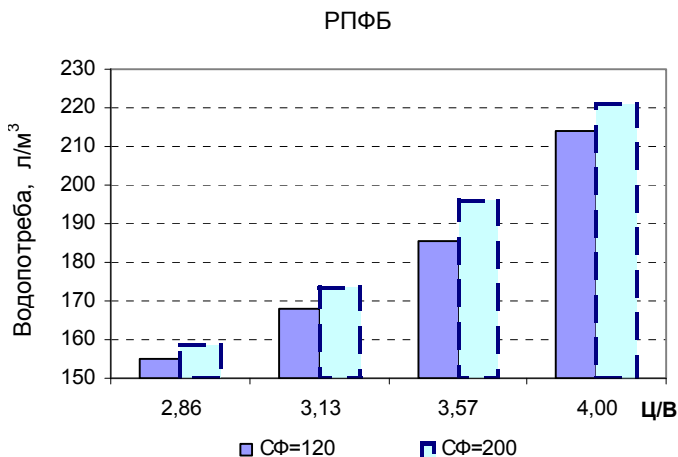
Як свідчать представлені на рис. 2.31 результати дослідів, відоме в технології бетону правило сталості водопотреби, у випадку використання реакційно-порошкових бетонних та фібробетонних сумішей не виконується. "Критичне" Ц/В для таких сумішей в досліджуваних межах 2,8...4 не відзначається.



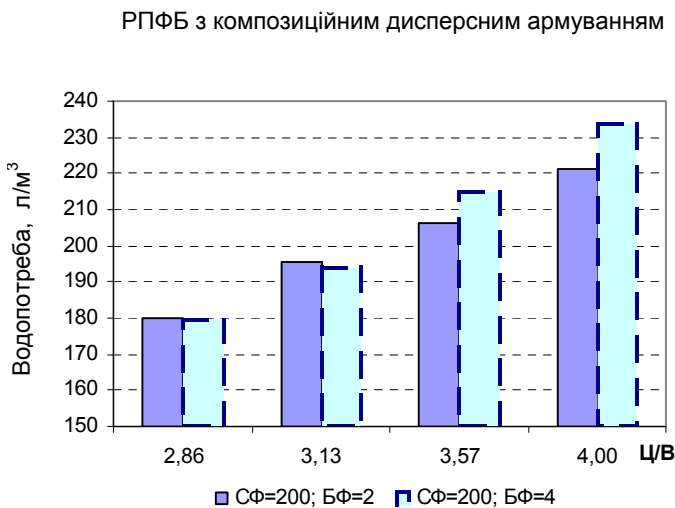
**Рис. 2.31.** Вплив Ц/В на водопотребу реакційно-порошкових бетонних та фібробетонних сумішей

Порівнюючи аналогічні склади сумішей без фібри та з фіброю, можна відзначити, що введення фібри призводить до зростання водопотреби на 5...15% залежно від виду та вмісту дисперсної арматури. Суміші із композиційним дисперсним армуванням характеризуються більшою водопотребою порівняно із монодисперсноармованими сумішами і, тим більше, порівняно із РПБ, що пояснюється більшою сумарною поверхнею, яка потребує змочування, у першому випадку.

Розглядаючи вплив вмісту фібри на водопотребу фібробетонних сумішей (рис. 2.32–2.33), можна відмітити закономірність росту водопотреби при зростанні її витрати.



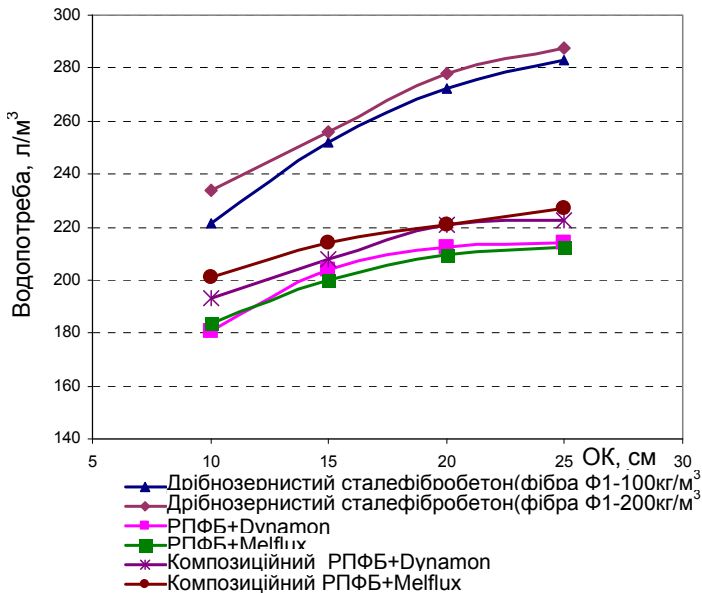
**Рис. 2.32.** Вплив вмісту сталеві фібри (СФ, кг/м<sup>3</sup>) та Ц/В на водопотребу РПФБ сумішей



**Рис. 2.33.** Вплив вмісту сталеві (СФ) та базальтові (БФ) фібри, в кг/м<sup>3</sup> та Ц/В на водопотребу РПФБ сумішей з композиційним дисперсним армуванням

Збільшення вмісту базальтової фібри з 2 до 4 кг/м<sup>3</sup> приводить до зростання водопотреби в середньому на 2...6% при високих значеннях Ц/В. При цьому при Ц/В = 2,8...3,1 цей вплив майже відсутній.

Для досліджуваних бетонів встановлено залежності водовмісту від рухомості бетонної суміші (рис. 2.34). Витрата суперпластифікатора Melflux 2651F та Dynamon SP-3 складала 1%. Витрати фібри складали для РПФБ – 200 кг/м<sup>3</sup>, для композиційного РПФБ – 200+2 кг/м<sup>3</sup>. Для порівняння наведені результати по дрібнозернистому фібробетону з використанням хвилястої сталеві макрофібри типу Ф1 (див. рис. 1.38).



**Рис. 2.34.** Залежності впливу на водопотребу фібробетонних сумішей показників рухомості при використанні водоредуруючих добавок

Як видно з наведених даних, застосування реакційно-здатних порошків в комплексі з добавками суперпластифікаторів призводить до того, що фібробетонні суміші (особливо композиційні) стають більш чутливими до зміни рухомості вже при невеликих змінах водовмісту.

**Збережуваність рухомості фібробетонних сумішей у часі.** Важливим питанням при дослідженні технологічних властивостей фібробетонних сумішей є прогнозування втрати рухомості – т.зв. "життєздатності", або збережуваності рухомості суміші в часі, що дозволяє вносити корективи при призначенні початкової легкоукладальності та визначати допустиму тривалість транспортування суміші.

Для високорухомих реакційно-порошкових бетонних та фібробетонних сумішей за показник збережуваності рухомості приймали час, за який середнє значення осадки конуса зменшиться від 25 до 20 см. Для порівняльної оцінки збережуваності рухомості сумішей в часі були проведені випробування фібробетонних сумішей, склади яких наведені в табл. 2.17.

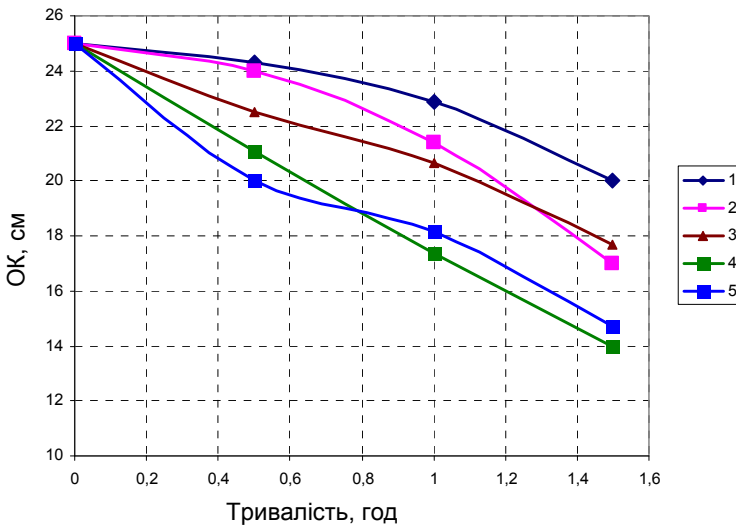
Таблиця 2.17

Склади фібробетонних сумішей

№	В/Ц	Витрата основних компонентів, кг/м <sup>3</sup>				Фібра, кг/м <sup>3</sup>	Вид та вміст пластифікатора, %
		Цемент	Пісок	Зола	МТК		
РПФБ							
1	0,33	700	1130	275	75	–	Dynamon (0,75%)
2	0,35	700	1130	275	75	200	Melflux (0,75%)
3	0,34	700	1130	275	75	200	Dynamon (0,75%)
4	0,28	700	1130	275	75	200	Melflux (1,5%)
5	0,27	700	1130	275	75	200	Dynamon (1,5%)
РПФБ з композиційним дисперсним армуванням							
6	0,29	700	1130	275	75	200+2	Melflux (1,5%)
7	0,29	700	1130	275	75	200+2*	Dynamon (1,5%)

\* Вказаний сумарний вміст сталевोї та базальтової фібри.

На рис. 2.35 представлено збережуваність показників рухомості РПФБ сумішей, вказаних в табл. 2.17 складів. Найбільші втрати рухомості в часі мають суміші з підвищеним вмістом суперпластифікаторів, найменші – з мінімальним вмістом пластифікатора та без використання фібри. Відомо, що рухомі пластифіковані суміші втрачають рухомість швидше, ніж рівнорухомі суміші без добавки суперпластифікатору, що закономірно пояснюється більшим вмістом останніх.

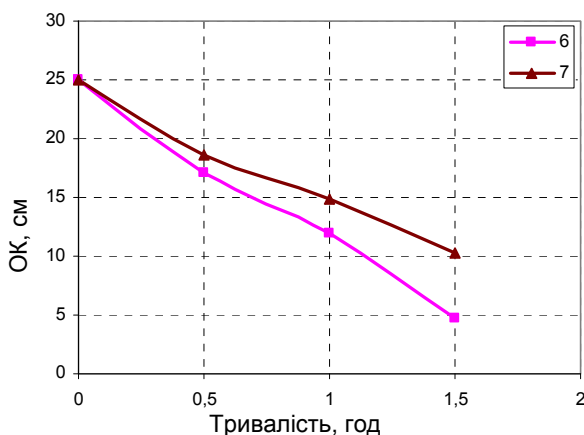


**Рис. 2.35.** Зміна рухомості фібробетонних сумішей за осадкою конуса (номера складів відповідають табл. 2.17)

Введення фібри приводить до деякого зменшення збережуваності рухомості суміші у часі у порівнянні із сумішшю без фібри. В цілому втрати рухомості протягом першої години для всіх складів є незначними. Збережуваність рухомості сумішей складів 1 – 5 становить відповідно 1,5 год, 1,2 год, 1,12 год, 0,65 год та 0,5 год.

Розглядаючи зміну рухомості у часі для фібробетону з композиційним дисперсним армуванням (рис. 2.36), можна відзначити наступні особливості. В цілому характер залежностей подібний РПФБ з моноармуванням, в той же час в

абсолютних значеннях втрата рухомості є більш суттєвою. Очевидно, це можна пояснити більшою зв'язаністю розчинової частини при наявності великої питомої поверхні дисперсної арматури. Також варто відзначити дещо кращу збережуваність суміші з використанням суперпластифікатора Dynamon SP3 у порівнянні із Melflux 2651f.



**Рис. 2.36.** Зміна рухомості фібробетонних сумішей з композиційним дисперсним армуванням за осадкою конуса (номера складів відповідають табл. 2.17)

Втрати рухомості протягом першої години для всіх складів є більш суттєвими порівняно із моноармованими РПФБ сумішами. Збережуваність рухомості сумішей складів 6 і 7 становить відповідно 0,31 год. та 0,42 год.

**Розшаровуваність фібробетонних сумішей.** Технологічні заходи, пов'язані з укладанням, ущільненням і обробленням армованих волокнами бетонних матеріалів, мають деякі особливості у порівнянні із традиційними. При виготовленні дисперсноармованих бетонів підвищену увагу необхідно приділяти тривалості ущільнення. В цілому високорухомі реакційно-порошкові бетони здатні до самоущільнення, однак введення фібри часто потребує



збільшення водопотреби, що не завжди можливо компенсувати збільшенням добавки суперпластифікатора. Таким чином, виникає потреба при зменшенні рухомості у застосуванні віброущільнення.

Час віброобробки спричиняє істотний вплив на рівномірність розподілу сталевих фібр по об'єму бетону. Перевищення часу вібрації бетонної суміші понад встановлений (залежно від його складу) може призвести до розшарування армованої суміші. Внаслідок різниці в значеннях середньої густини бетону і сталі під дією сил гравітації сталева фібра в процесі вібрації суміші прагне опуститися вниз (до піддону). Іноді ця властивість використовується для забезпечення зонного армування, коли за розрахунком у будь-якій частині (зоні) виробу потрібно більш високий рівень армування. Регулювання часу вібрації для забезпечення рівномірного або зонного армування здійснюється на стадії виготовлення виробів [10].

Для вивчення процесів розшарування РПФБ сумішей, в т.ч. із композиційним дисперсним армуванням, були виконані експериментальні дослідження пов'язані із встановленням впливу вмісту сталевих та базальтових фібр та тривалості віброущільнення на розшарування РПФБ суміші різної рухомості. Всі дослідження виконувалися на РПБ однакового складу, необхідна рухомість бетонної суміші забезпечувалась підбором вмісту суперпластифікатора поліакрилатного типу Дупатон SP3. Вміст сталевих фібр складав 120 та 200 кг/м<sup>3</sup> бетонної суміші.

Рівномірність розподілення сталевих фібр по об'єму бетонної суміші оцінювалася за коефіцієнтом розшарування, який визначався за методикою наведеною в СТО НОНСТРОЙ 2.27.125 – 2013 [24]. Дана методика полягає в наступному: в циліндричну форму висотою 200 мм та діаметром 100 мм вкладають фібробетонну суміш та піддають її віброущільненню. Після цього отриманий циліндр розрізають на дві рівні частини – верхню та нижню. З кожної із частин, за допомогою промивання, відділяють фібру та зважують її, а коефіцієнт розшарування визначають за формулою:

$$K_p = m_{\text{верх},f} / m_{\text{нижн},f} \quad (2.22)$$

де  $m_{\text{верх},f}$  та  $m_{\text{нижн},f}$  – маса фібри відповідно у верхній та нижній частині циліндричного зразку після його віброущільнення.

На першому етапі вивчали розшаровуваність РПФБ сумішей при різних значеннях рухомості. Результати експериментальних досліджень коефіцієнтів розшарування РПФБ наведені в табл. 2.18 та на рис. 2.36.

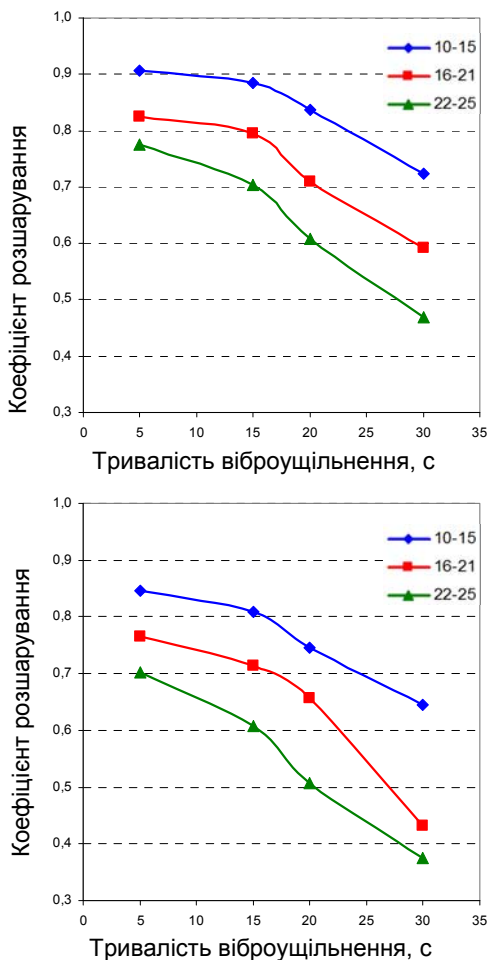
Таблиця 2.18

Вплив тривалості віброущільнення та рухомості суміші на коефіцієнт розшарування РПФБ

Вміст сталеві фібри, кг/м <sup>3</sup>	Рухомість суміші (ОК), см	Коефіцієнт розшарування при тривалості віброущільнення, с			
		5	15	20	30
120	10-15	<b>0,91</b>	<b>0,89</b>	<b>0,84</b>	0,72
	16-21	<b>0,83</b>	<b>0,80</b>	0,71	0,59
	22-25	<b>0,78</b>	0,70	0,61	0,47
200	10-15	<b>0,85</b>	<b>0,81</b>	0,75	0,65
	16-21	<b>0,77</b>	0,71	0,66	0,43
	22-25	0,70	0,61	0,51	0,38

Отримані експериментальні результати свідчать про те, що рухомість а також тривалість віброущільнення суттєво впливають на коефіцієнт розшарування РПФБ суміші. Встановлено, що при збільшенні рухомості бетонної суміші необхідно суттєво обмежувати тривалість віброущільнення. Для забезпечення необхідного коефіцієнту розшарування, який у відповідності з [24] повинен складати не менше 0,8 для сумішей із маркою за легкоукладальністю Р3 і не менше 0,75 для марок за легкоукладальністю Р4 і Р5, оптимальна тривалість віброущільнення складає не більше 15-20 секунд для сумішей, що характеризуються рухомістю 10-15 см, 15 секунд для сумішей з рухомістю 16-21 см та не більше 5 секунд для сумішей з рухомістю 22-25 см. Також встановлено, що збільшення вмісту сталеві фібри у дослідженому діапазоні погіршує коефіцієнт розшарування РПФБ в середньому на 9%

при ОК = 10-15 см, на 10...15% при ОК = 16-21 см і до 25% при ОК = 22-25 см. Як слідує з отриманих даних, досягнути значення коефіцієнта розшарування, що задовольняє нормативним вимогам, при витраті фібри 200 кг/м<sup>3</sup> і рухомості суміші Р5 стає взагалі неможливим.



**Рис. 2.36.** Залежність коефіцієнту розшарування від тривалості віброущільнення РПФБ при різних рухомості бетонної суміші (ОК, см) при витраті сталеві фібри 120 кг/м<sup>3</sup> (а) та 200 кг/м<sup>3</sup> (б)

На другому етапі визначали розшаровуваність РПФБ з композиційним дисперсним армуванням при введенні базальтової фібри в кількості 2 кг/м<sup>3</sup>. Значення рухомості та тривалості віброущільнення приймали аналогічні до попереднього етапу. Результати експериментальних досліджень коефіцієнтів розшарування композиційних РПФБ сумішей наведені в табл. 2.19 та на рис. 2.37.

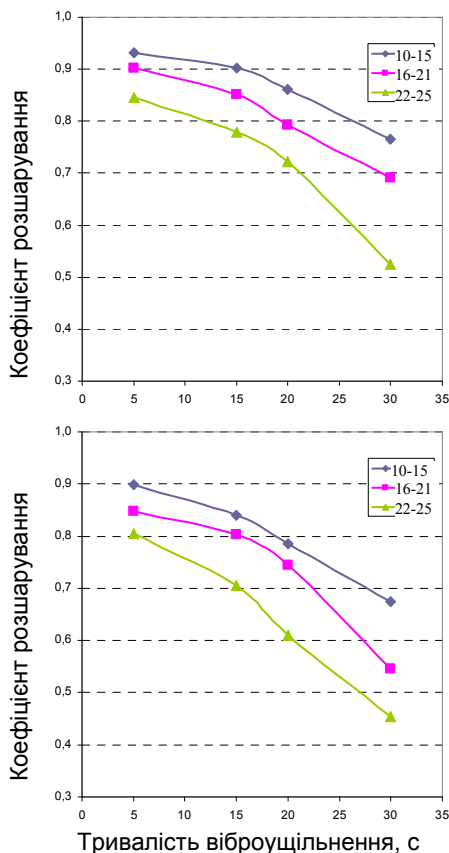
Таблиця 2.19

Вплив тривалості віброущільнення та рухомості бетонної суміші на коефіцієнт розшарування РПФБ з композиційним дисперсним армуванням

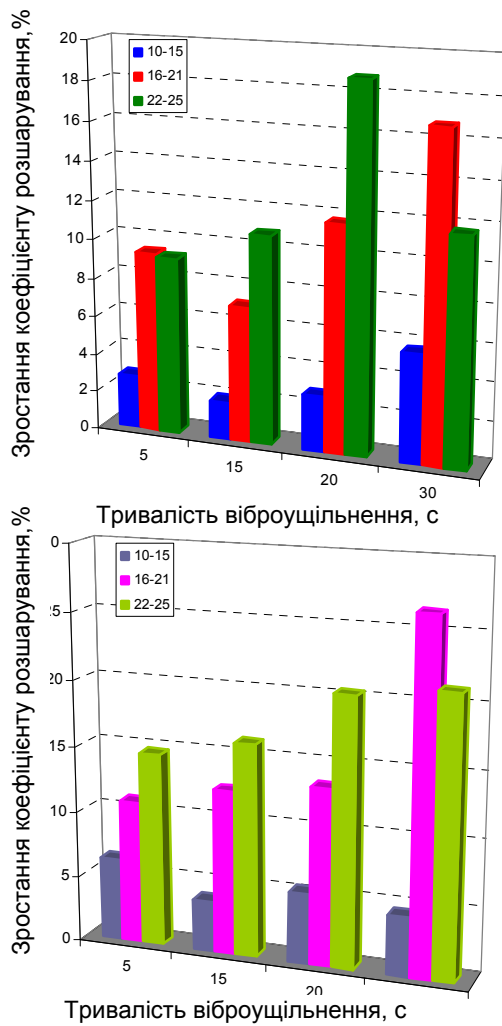
Вміст сталеві/ /базальтової фібри, кг/м <sup>3</sup>	Рухомість суміші (ОК), см	Коефіцієнт розшарування при тривалості віброущільнення, с			
		5	15	20	30
120 / 2	10-15	<b>0,93</b>	<b>0,90</b>	<b>0,86</b>	0,77
	16-21	<b>0,90</b>	<b>0,85</b>	<b>0,79</b>	0,69
	22-25	<b>0,85</b>	<b>0,78</b>	0,72	0,53
200 / 2	10-15	<b>0,90</b>	<b>0,84</b>	0,79	0,67
	16-21	<b>0,85</b>	<b>0,80</b>	<b>0,75</b>	0,55
	22-25	<b>0,81</b>	0,71	0,61	0,45

Характер отриманих залежностей в цілому відповідає результатам, отриманим для моноармованого РПФБ. В той же час абсолютні значення коефіцієнту розшарування для сумішей, що містять в собі базальтову фібру, є вищими практично для всіх комбінацій рухомості і тривалості віброущільнення. Оптимальна тривалість віброущільнення з метою забезпечення нормативних значень коефіцієнту розшарування в даному випадку складає не більше 20 секунд для сумішей, що характеризуються рухомістю 10-15 см та 16-21 см, та 5-15 секунд для сумішей з рухомістю 22-25 см. Порівнюючи дані табл. 2.18 та 2.19 можна зробити висновок, що можлива тривалість віброущільнення для більшості сумішей з композиційним дисперсним армуванням зросла на 1-2 діапазони. Також, якщо для звичайного РПФБ при витраті сталеві фібри 200 кг/м<sup>3</sup> було неможливим забезпечення нормативних значень коефіцієнту розшарування для сумішей з

рухомістю Р4 та Р5, то для композиційного фібробетону це вдається навіть з деяким запасом. Якщо при рухомості суміші 10-15 см приріст коефіцієнту розшарування складає 3...7%, то для більш рухомих сумішей позитивний вплив базальтової фібри проявляється більш яскраво і може досягати 20% для сумішей з рухомістю Р5 і 25% з рухомістю Р4 (рис. 2.37, 2.38).



**Рис. 2.37.** Залежність коефіцієнту розшарування від тривалості віброущільнення РПФБ з композиційним дисперсним армуванням при різних рухомості бетонної суміші (ОК, см) та при витраті сталеві фібри 120 кг/м<sup>3</sup> (а) і 200 кг/м<sup>3</sup> (б)



**Рис. 2.38.** Збільшення коефіцієнту розшарування при використанні композиційного дисперсного армування при витраті сталеві фібри  $120 \text{ кг/м}^3$  (а) і  $200 \text{ кг/м}^3$  (б)

Варто відмітити, що перевага композиційного дисперсного армування проявляється сильніше в міру зростання тривалості віброущільнення та збільшення витрати сталевих фібри.

Виконані експериментальні дослідження підтверджують висловлену раніше гіпотезу про можливість уникнення або суттєвого зменшення розшарування фібробетонних сумішей і підвищення однорідності структури фібробетонів за рахунок композиційного дисперсного армування.

#### **2.4. Структурні особливості реакційно-порошкових фібробетонів з композиційним дисперсним армуванням**

Низький водовміст досліджуваних фібробетонних сумішей, інтенсивна гідратація та тверднення обумовлюють відповідні особливості порової структури бетонів.

При вивченні якісних особливостей порової структури бетонів розповсюджений метод, оснований на аналізі кінетики водонасичення [25].

Встановлено [25], що криві, які характеризують зміну водопоглинання важкого бетону по мірі збільшення тривалості тверднення задовільно апроксимуються функціями, що мають наступний загальний вид:

$$W_{\tau} = W_{max} \left[ 1 - e^{-(\lambda \tau)^{\alpha}} \right], \quad (2.23)$$

де  $W_{\tau}$  – водопоглинання зразка за час  $\tau$ ;

$W_{max}$  – максимальне водопоглинання;

$\lambda$  – коефіцієнт, що характеризує середній розмір капілярних пор;

$\alpha_0$  – коефіцієнт однорідності розмірів пор.

Слід відзначити, що чим нижче водопоглинання та значення коефіцієнта середнього розміру пор ( $\lambda$ ) і чим вищий показник однорідності пор за розмірами ( $\alpha$ ), тим рівномірніше

розподілені пори за розмірами, що забезпечує отримання щільної та однорідної структури матеріалу.

Для розрахунку коефіцієнтів  $\lambda$  та  $\alpha$  залежно від значень  $W_\tau$ ,  $W_{max}$  та  $\tau$  в ДСТУ Б В.2.7-170:2008 запропоновані відповідні номограми.

Визначення показників пористості фібробетонів проводили на зразках-кубах з ребром 10 см. Повний об'єм пор бетону знаходили за формулою:

$$P_n = \left( \frac{\rho_\delta - \rho_0}{\rho_\delta} \right), \quad (2.24)$$

де  $\rho_\delta$  – густина подрібненого в порошок бетону,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\rho_0$  – середня густина сухого бетону,  $\text{кг/м}^3$ .

Об'єм відкритих капілярних пор знаходили за формулою:

$$P_0 = W_0, \quad (2.25)$$

де  $W_0$  – об'ємне водопоглинання зразків, %.

Кінетику водопоглинання визначали шляхом дискретного зважування попередньо висушених зразків в процесі їхнього водопоглинання до постійної маси.

Величину об'ємного водопоглинання розраховували за формулою:

$$W_0 = W_m \rho_0 = \frac{m_{24} - m_0}{m_{24} - m_{24}^B}, \quad (2.26)$$

де  $W_m$  – водопоглинання по масі;

$m_0$  та  $m_{24}$  – маса зразка до занурення у воду та через 24 год після занурення, визначена на повітрі;

$m_{24}^B$  – маса зразка через 24 год після занурення у воду;

$\rho_0$  – середня густина зразка бетону.

Результати дослідів та розрахунків приведені в табл. 2.19, і на рис. 2.39.

Аналіз даних, приведених в табл. 2.20 і на рис. 2.39 показує, що як і варто було очікувати, зменшення водовмісту та водоцементного відношення бетонних сумішей призвело до



суттєвого зменшення водопоглинання як характеристики відкритої капілярної пористості.

Теоретично цей висновок слідує з аналізу формули капілярної пористості бетону:

$$P_{\text{кап}}^{\circ} = \frac{B - 0,5\alpha C}{1000}, \quad (2.27)$$

де  $\alpha$  – ступінь гідратації цементу;

$C$  – витрата цементу, кг/м<sup>3</sup>.

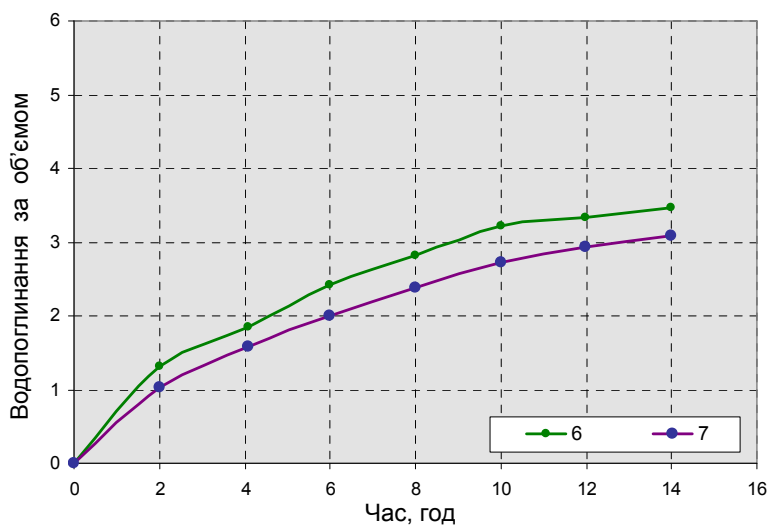
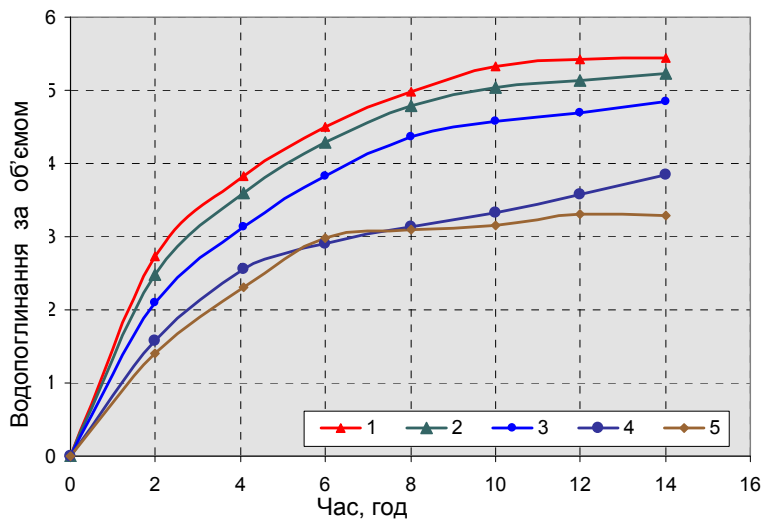
Таблиця 2.20

Параметри порової структури реакційно-порошкових фібробетонів

№ складів	Водоцементне відношення	Водовміст, кг/м <sup>3</sup>	Загальна пористість, % ( $P_0$ )	Відкрита капілярна пористість, % ( $W_0$ )	Показник середнього розміру пор $\lambda$	Показник однорідності пор $\alpha_0$	Фібра, кг/м <sup>3</sup>	Вид та вміст пластифікатора, %
РПФБ								
1	0,33	231	10,1	6,5	0,59	0,52	–	Dynamon (0,75%)
2	0,35	245	10,3	6,4	0,57	0,54	200	Melflux (0,75%)
3	0,34	238	8,4	4,4	0,56	0,55	200	Dynamon (0,75%)
4	0,28	196	8,6	4,3	0,42	0,67	200	Melflux (1,5%)
5	0,27	189	10,5	4,3	0,43	0,65	200	Dynamon (1,5%)
РПФБ з композиційним дисперсним армуванням								
6	0,29	203	8,1	4,8	0,36	0,71	200+2*	Melflux (1,5%)
7	0,29	1203	8,3	4,6	0,33	0,72	200+2*	Dynamon (1,5%)

**Примітки:** 1. Номера складів бетону відповідають табл. 7.6.

2. Температура води при випробуванні бетону на водопоглинання  $t=20^{\circ}\text{C}$ .



**Рис. 2.28.** Кінетика зміни водопоглинання РПФБ (а) та РПФБ з композиційним дисперсним армуванням (б) (номера кривих відповідають складам, приведеним в табл. 2.17)

Спостерігається чітка кореляція вказаних вище характеристик та параметрів порової структури  $\lambda$  та  $\alpha_o$ . Зменшення показника середнього розміру пор супроводжується зростанням впорядкованості структури, про що свідчить свідчить збільшення показника однорідності  $\alpha_o$ .

Важливим наслідком введення суперпластифікатору в фібробетонні суміші є покращення структури порового простору за рахунок зменшення середнього розміру пор та підвищення однорідності їхнього розподілення. Зменшення товщини водних прошарків на зернах в'язучого обумовлює зменшення середнього радіуса капілярів [26]. На зменшення радіуса пор і однорідність їхнього розподілення позитивно впливає також висока питома поверхня в'язучого. На думку В. Г. Батракова, зменшенню розміру пор бетонів із суперпластифікаторами та однорідності їхнього розподілення сприяє адсорбція на активних центрах твердої фази.

Базальтову фібру в даному випадку можна розглядати в якості своєрідної підложки [20] – поверхні, на якій випереджаючим темпом формується щільний та міцний шар цементного каменю (контактна зона), що проявляє при достатньому насиченні суміші такими волокнами суттєвий вплив на міцнісні та деформативні властивості фібробетону.

Кінетику росту водопоглинання для всіх видів бетону можна описати логарифмічними залежностями (рис. 2.39). Для РПФБ з композиційним дисперсним армуванням характерні менші показники як середнього розміру пор  $\lambda$ , так і більш високі показники однорідності  $\alpha_o$  (табл. 2.20).

Ступінь впливу дисперсного армування зростає зі зменшенням геометричних розмірів фібр і збільшенням їх кількісного вмісту в суміші. Однак при досягненні деякого порогового значення концентрації фібр однорідність їх розподілу в суміші погіршується, утворюються грудки з волокон, не покриті цементним тістом, що негативно впливає на порову структуру матеріалу.

## 2.5. Усадочні деформації РПФБ

Тріщиностійкість бетонів і фібробетонів в значній мірі визначається також усадочними деформаціями. А.Е. Десов запропонував [26], як один з критеріїв тріщиностійкості цементного каменю, так званий модуль Т:

$$T = f_{c,tf} / \varepsilon_{yc}, \quad (2.28)$$

де  $f_{c,tf}$  – міцність зразків на розтяг;

$\varepsilon_{yc}$  – величина усадочних деформацій до моменту появи тріщин.

Модуль Т при співставних витратах цементного тіста та незмінних заповнювачах може слугувати, очевидно, і для порівняльної характеристики тріщиностійкості бетонів.

На усадці бетонів позначаються численні фактори, вирішальним з яких є витрата води. При незмінній витраті води в суміші величина  $\varepsilon_{yc}$  мало залежить від витрати цементу та Ц/В [27]. В той же час відома позитивна роль дисперсного армування структури бетону в плані зменшення усадочних деформацій.

Усадочні деформації бетонів і фібробетонів (табл. 2.21), склади яких приведені в табл. 2.17 визначали за допомогою штативного прибору, оснащеного індикатором часового типу з ціною поділки 0,001 мм. Зразки зберігали при температурі  $20 \pm 2^\circ \text{C}$  і відносній вологості  $75 \pm 5\%$ . Криві усадочних деформацій наведені на рис. 2.40. Їх аналіз показує, що для всіх досліджуваних складів усадочні деформації стабілізуються до віку 60 діб.

Граничні усадочні деформації фібробетонів, що досягаються до 60-добового віку в залежності від складу коливається в інтервалі від 3,8 до 6,7 ( $\times 10^{-4}$ ). Найбільш низькі значення усадки характерні для РПФБ з композиційним дисперсним армуванням з мінімальним вмістом води, і суперпластифікатором Melflux 2651F (склад № 7). При постійному водовмісті усадочні деформації дещо збільшуються із збільшенням вмісту суперпластифікатора. До 7 добового віку

усадка сягає до 30...40% граничних значень, 28 діб – 50%, 90 діб – 85...95%.

Таблиця 2.21

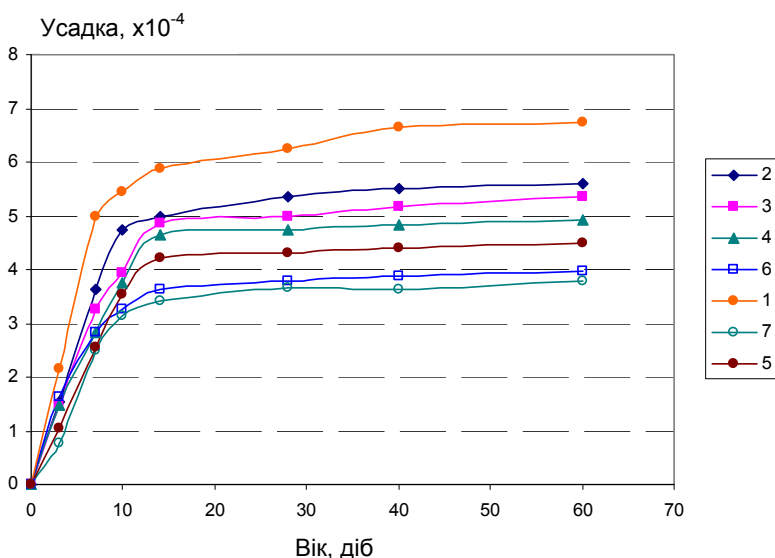
Значення усадочних деформацій  $\varepsilon_{yc}$  і модуля тріщиностійкості бетонів

№ складів	Значення $\varepsilon_{yc}$ та модуля Т для РПБ та РПФБ у віці 28 діб		
	$\varepsilon_{yc}$	$f_{c,tf}^{\perp}$ , МПа	$f_{c,tf} / \varepsilon_{yc}$
1	6,3	22,5	3,57
2	5,3	27,8	5,25
3	5,0	29,6	5,92
4	4,7	37,2	7,91
5	4,3	36,5	8,49
6	3,80	39,2	10,32
7	3,70	41,3	11,16

Введення сталевोї фібри в оптимальній кількості, встановлений з позицій міцнісних характеристик, позитивно позначається на зменшенні усадки, хоча цей вплив і не є значним. В цілому усадочні деформації для РПФБ з композиційним дисперсним армуванням є нижчими на 20...30% за усадку РПФБ з монодисперсним армуванням і до 70% за усадку РПБ, що очевидно пояснюється позитивним впливом базальтової фібри.

Також проводили порівняльні дослідження на композиційному РПФБ із використанням сталевої мікрофібри типу Ф5 та хвилястої фібри Ф1. Об'ємний вісоток армування сталевую фіброю варіювався від 1 до 3% об. При цьому вміст базальтової фібри був зафіксований на встановленому раніше оптимальному значенні 2 кг/м<sup>3</sup>.

Залежно від типу фібри й відсотку армування деформації усадки РПФБ з композиційним дисперсним армуванням можуть бути як рівні, так і більше або менше деформацій бетонної матриці (рис. 2.41). Цей результат можна пояснити впливом на усадку фібробетону двох різних процесів. Один з них створює умови для збільшення усадки фібробетону в порівнянні з усадкою матриці, а інший навпаки перешкоджає розвитку усадочних деформацій. При цьому ступінь впливу цих процесів залежить від типу фібри та її вмісту.

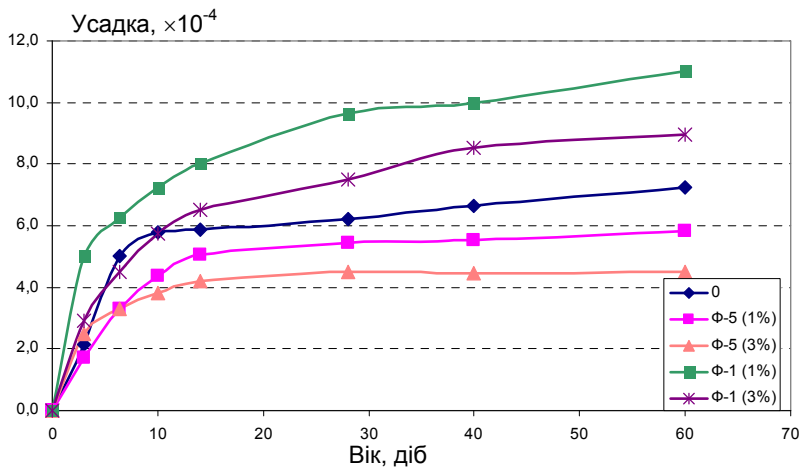


**Рис. 2.40.** Криві усадочних деформацій  
Номери кривих відповідають складам, наведеним в табл. 2.17

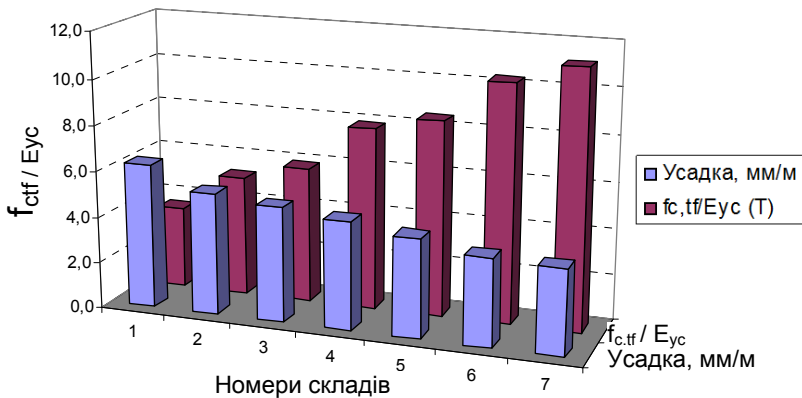
Хвиляста макрофібра типу Ф-1 під час перемішування й укладання суміші розуцільнює її, створюючи в ній заповнені пароповітряною сумішшю пори, що призводить до збільшення усадки.

Сталева мікрофібри типу Ф-5, що має значно більшу сумарну поверхню зчеплення із затверділою матрицею зменшує усадочні деформації останньої. Зменшення усадочних деформацій має місце також при більших відсотках армування.

В табл. 2.17 для досліджуваних складів РПФБ приведені значення усадочних деформацій і модуля тріщиностійкості у віці 28 діб, з яких слідує, що для всіх складів як РПФБ (2-5), так і РПФБ з композиційним дисперсним армуванням (6-7) при зменшенні величини  $\varepsilon_{yc}$ , спостерігається тенденція до зростання значення модуля Т (рис. 2.42).



**Рис. 2.41.** Криві усадочних деформацій композиційного РПФБ із вмістом базальтової фібри  $2 \text{ кг/м}^3$  залежно від використання сталеві фібри типів  $\Phi$ -1 та  $\Phi$ -5



**Рис. 2.42.** Значення модуля  $T = f_{c,tf}/\epsilon_{yc}$  у віці 28 діб для досліджуваних складів РПФБ (номера складів відповідно до табл. 2.17)

## 2.6. Морозостійкість РПФБ

У відповідності із сучасними уявленнями бетонознавства [27] морозостійкість бетону визначається комплексом факторів, і в першу чергу, їх капілярною пористістю, а також співвідношенням об'ємів відкритих капілярних та закритих повітряних пор. Суттєве значення поряд з хіміко-мінералогічним складом цементного клінкера має вид і вміст добавок.

Для фібробетонів, поряд з тим, велике значення має характер і вид дисперсного армування [10]. Фіброві волокна, підвищуючи міцність на розтяг бетону, дозволяють краще протидіяти напруженням, що виникають в процесі замерзання води в капілярах.

Відомо [28], що застосування композиційних мінеральних в'язучих, дозволяє в бетонних сумішах з полікарбоксилатним суперпластифікатором довести капілярну пористість до 5%, що відповідно з відомими рекомендаціями повинно забезпечувати достатньо високу морозостійкість. Разом з цим, дані про вплив добавок суперпластифікаторів на морозостійкість бетонів суперечливі. В роботі [28] повідомлялось про високу морозостійкість бетонів з добавкою суперпластифікатора С-3 при понижених В/Ц в результаті ущільнення структури цементного каменю і бетону та зменшення капілярної пористості пропорційно зниженню кількості води замішування. На думку частини спеціалістів в бетонах із суперпластифікаторами погіршується порова структура, збільшуються розміри капілярів і відстані між закритими порами. По даним японських спеціалістів задовільна морозостійкість високоміцних бетонів з В/Ц=0,3 забезпечується при повітровтягуванні не менше 5%. Вказані міркування послугували основою для рекомендацій [28] вводити в бетони високої морозостійкості поряд із суперпластифікатором повітровтягуючі добавки.

В реакційно-порошкових бетонах на дію суперпластифікаторів певний вплив має підвищена дисперсність системи. Остання, збільшуючи поверхню розділу «мінеральна частина-вода», повинна сприяти поряд із збільшенням



адсорбційної активності добавок ПАР також покращенню структури порового простору. Наші досліді (табл. 2.20) показали, що для досліджуваних РПФБ та композиційних РПФБ характерним є поряд із зменшенням капілярної пористості зменшення їх розмірів і підвищення однорідності розподілу пор. За даними В.Г. Батракова [28] в бетонах на в'язучому марки 500 при В/Вж=0,31 і міцності при стиску в 28 діб 59,8 МПа після 500 циклів коефіцієнт морозостійкості склав 1,08. В той же час бетони на вихідному бездобавочному портландцементі і цементі з добавкою С-3 при В/Вж=0,40 і міцності 36 МПа витримали лише 300 циклів заморожування та відтавання при коефіцієнті морозостійкості відповідно 0,88 та 0,89.

Для реакційно-порошкових фібробетонів характерними є достатньо високі значення морозостійкості, на що впливають як характеристики порової структури бетону, так і характер і ступінь дисперсного армування. Значення марки за морозостійкістю для таких бетонів можуть досягати F1000 і більше [29].

Для бетонних сумішей досліджуваних складів визначали компресійним способом повітровтягнення. Знаючи об'єм відкритих капілярних пор, що чисельно дорівнює об'ємному водопоглинанню ( $V_{\text{кап.пор}}=W_o$ ) і об'єму замерзаючої води ( $V_{3.в.}$ ), а також об'єм втягнутого повітря ( $V_{в.п.}$ ), розраховували ступінь насичення (CH) – перший структурний критерій морозостійкості, запропонований Т. Уайтсайдом і Х.Свитом [26]:

$$CH = \frac{V_{3.в.}}{V_{3.в.} + V_{в.п.}}. \quad (2.29)$$

Було встановлено, що при  $CH < 0,88$  бетон є морозостійким, а при  $CH > 0,91$  швидко руйнується. Морозостійкість (F) зв'язана з величиною CH зворотною залежністю:

$$F = \frac{1}{CH} = 1 + \frac{V_{в.п.}}{V_{3.в.}}. \quad (2.30)$$

З розрахункових значень СН (табл. 2.22) слідує, що для РПФБ, з використанням добавок суперпластифікаторів, можна прогнозувати достатньо високу морозостійкість.

Вказаний прогноз був підтверджений прямими експериментальними дослідженнями. Визначення морозостійкості проводили на зразках розміром 10×10×10 см за третім методом згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96 з водонасиченням в 5% розчині хлориду натрію із заморожуванням до температури (-50±2)°С і відтаванням при температурі (20±2)° С.

Морозостійкість оцінювали по зміні кубикової міцності зразків після 4, 8, 15, 19, і 27 циклів попереминого заморожування й відтавання, число яких відповідало марці по морозостійкості F150, F300, F500, F600, F800.

Таблиця 2.22

Повітровтягування фібробетонних сумішей

№	В/Ц	Фібра, кг/м <sup>3</sup>	Вид та вміст пластифікатора, %	Об'єм втягнутого повітря, (V <sub>в.п.</sub> ), %	Критерій $CH = \frac{V_{\text{кап.пор}}}{V_{\text{кап.пор}} + V_{\text{в.п.}}}$
РПФБ					
1	0,33	—	Dynamon (0,75%)	1,9	0,77
2	0,35	200	Melflux (0,75%)	2,2	0,74
3	0,34	200	Dynamon (0,75%)	2,1	0,68
4	0,28	200	Melflux (1,5%)	2,6	0,62
5	0,27	200	Dynamon (1,5%)	2,6	0,62
РПФБ з композиційним дисперсним армуванням					
6	0,29	200+2*	Melflux (1,5%)	2,7	0,64
7	0,29	200+2*	Dynamon (1,5%)	2,8	0,62

\* Вказаний сумарний вміст сталевोї та базальтової фібри.

Оцінку морозостійкості по втраті маси не проводили, оскільки попередньо проведені експерименти показали, що зразки зі сталевіфібробетонів та матриці практично не пошкоджуються і тому втрати настільки незначні, що їх важко

виявити, враховуючи протилежний ефект, викликаний насиченням зразків солями.

Також в якості критерію морозостійкості використовували коефіцієнт морозостійкості  $K_F$ , який представляє собою відношення міцності при стиску основних зразків через певну кількість циклів перемінного заморожування і відтавання та міцності контрольних зразків. В табл. 2.23 представлені число циклів, що відповідає марці за морозостійкістю та значення коефіцієнта морозостійкості. На рис. 2.43, 2.44 показана зміна кубикової міцності під час випробувань зразків.

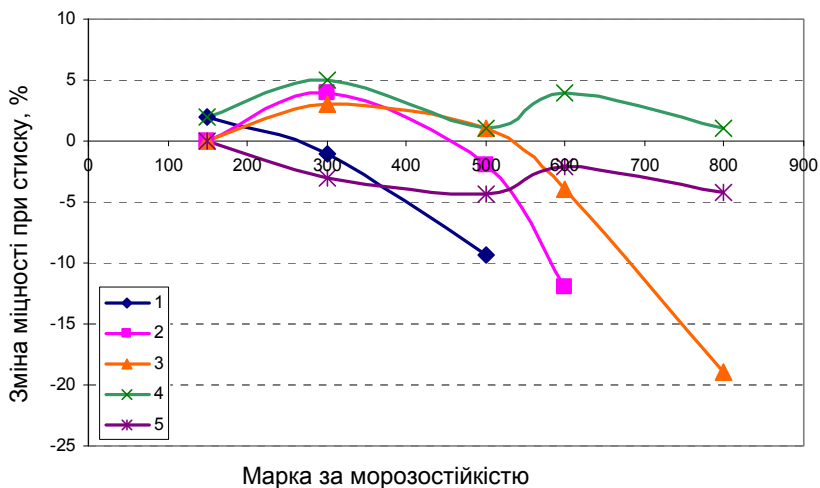
Таблиця 2.23

Результати визначення морозостійкості фібробетонів

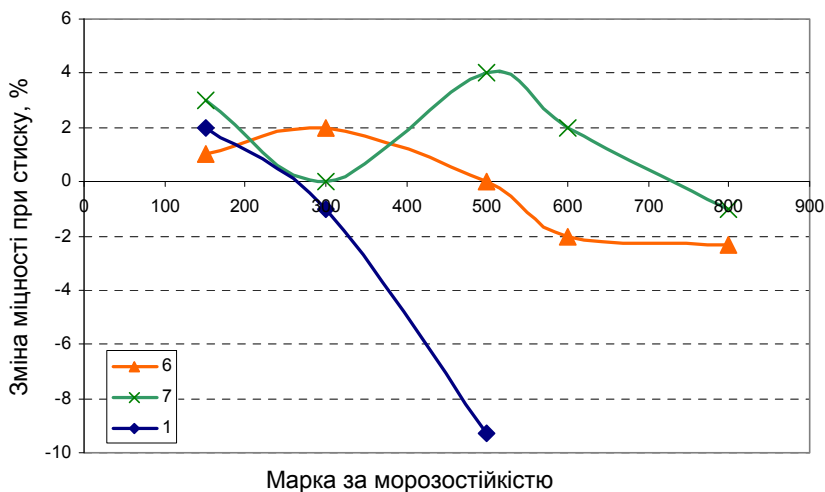
№	В/Ц	Фібра, кг/м <sup>3</sup>	Вид та вміст пластифіка- тора, %	Кількість циклів за третім методом	Марка за морозостій- кістю	Коефіцієнт морозостій- кості
РПФБ						
1	0,33	–	Dynamon (0,75%)	15	500	0,94
2	0,35	200	Melflux (0,75%)	15	500	0,96
3	0,34	200	Dynamon (0,75%)	19	600	0,97
4	0,28	200	Melflux (1,5%)	27	800	1,01
5	0,27	200	Dynamon (1,5%)	27	800	0,99
РПФБ з композиційним дисперсним армуванням						
6	0,29	200+2*	Melflux (1,5%)	27	800	1,02
7	0,29	200+2*	Dynamon (1,5%)	27	800	0,98

\* Вказаний сумарний вміст сталевोї та базальтової фібри.

Як видно з даних табл. 2.23, отримані значення морозостійкості достатньо добре корелюють із розрахунковими значеннями критерію СН. Також, накладається фактор наявності фібри, що добре прослідковується в збільшених значеннях морозостійкості у відповідних зразках.



**Рис. 2.43.** Залежність зміни міцності зразків РПФБ від кількості циклів заморозування відтавання (номера складів відповідно до табл. 2.23)



**Рис. 2.44.** Залежність зміни міцності зразків РПБ та РПФБ з композиційним дисперсним армуванням від кількості циклів заморозування відтавання (номера складів відповідно до табл. 2.23)

Необхідно відзначити коливання зміни міцності зразків під час випробувань (тобто коефіцієнта морозостійкості) як в меншу, так і в більшу сторону (рис. 2.43, 2.44). Ріст міцності бетону в окремих випадках можна пояснити заповненням пор бетону кристалами солей із розчину, якими насичувалися зразки під час проведення випробувань. Суттєвого впливу на морозостійкість зразків РПФБ від введення базальтової фібри в досліджуваних умовах зафіксовано не було.

Таким чином, проведені експериментальні дослідження впливу факторів складу на морозостійкість фібробетонів, показали досягнення марок за морозостійкістю F800 і, потенційно, ще більше для складів № 6-7 з використанням композиційного дисперсного армування та гіперпластифікатора Dynamon SP3.

## **2.7. Реакційно-порошкові бетони з дисперсним армуванням сталевими сітками**

Деформативність будівельних матеріалів, зокрема бетонів, їх здатність чинити опір механічним впливам значною мірою залежать від границі міцності на розтяг при згині. Для бетонних та залізобетонних конструкцій цей показник, а також здатність сприймати навантаження без втрати несучої здатності можуть забезпечуватися різними способами, що ґрунтуються на збільшенні деформативно-пластичних властивостей.

Одним із способів підвищення деформативних властивостей бетонів є просочування бетонів різними полімерними речовинами [30]. Утворені таким чином бетонополімери характеризуються збільшеними у порівнянні із вихідним бетоном значеннями міцності на розтяг при згині в 2...3 рази та граничними деформаціями в 2...3 рази. Однак, недоліком даного способу є складність технології, пов'язана з необхідністю попереднього висушування затверділого бетону та подальшого його просочування протягом декількох годин полімерними розчинами або мономерами, які в подальшому полімеризуються. Крім того, суттєво зменшується термічна стійкість таких бетонів.

Також загальновідомим способом підвищення деформативних властивостей бетону є введення до його складу сталеві фібри в кількості  $100...300 \text{ кг/м}^3$  [10]. За рахунок цього міцність на розтяг при згині утворюваних таким чином фібробетонів збільшується в 3...4 рази і досягає значень 15...18 МПа, а відносні граничні деформації зростають в 2...3 рази (до  $10...15 \cdot 10^{-4}$ ). Недоліком цього способу є складність орієнтованого розташування сталеві фібри в масиві бетону паралельно виникаючим розтягуючим напруженням та неможливості забезпечення спільної роботи окремих волокон. Це призводить до недостатньо ефективного використання у повній мірі всієї маси фібри і, як наслідок, потенційної втрати можливості збільшення значень пластичних деформацій.

Додаткового збільшення деформативних властивостей бетону для отримання матеріалу із підвищеними деформативними властивостями можна досягнути, в "реакційно-порошкових фібробетонах". За рахунок використання тонкодисперсних заповнювачів в даному способі вдається досягти більшої однорідності бетонної матриці, що приводить до збільшення міцності на розтяг при згині до 20...25 МПа та значень граничних деформацій до  $15 \cdot 10^{-4}$  [31].

Подальше збільшення значень деформативних властивостей бетону, а саме границі міцності на розтяг при згині та граничних деформацій бетону можна досягнути, якщо використовувати в якості дисперсного армуючого компонента, сталеві сітки, які розташовують в бетоні перпендикулярно діючим навантаженням (паралельно виникаючим розтягуючим напруженням).

Використовували реакційно-порошковий бетон наступного складу,  $\text{кг/м}^3$ : портландцемент ПЦ 500 I – 700; мелений пісок ( $S_{\text{пит}} = 250 \text{ кг/м}^2$ ) – 360; пісок (0,16...1,25 мм) – 1130; СП Dynamon SP3 – 1,5%. В/Ц суміші склав 0,28, рухомість 25 см. В якості дисперсного армуючого компонента (аналога фібри) використовували сталеві сітки, виготовлені із сталі Ст.3 із квадратними комірками діаметром стержнів 0,8 мм та кроком 10 мм. У форму для зразка розміром  $16 \times 9 \times 4$  см укладали 10 сіток з відстанями між ними 4 мм. Далі виготовляли бетонну

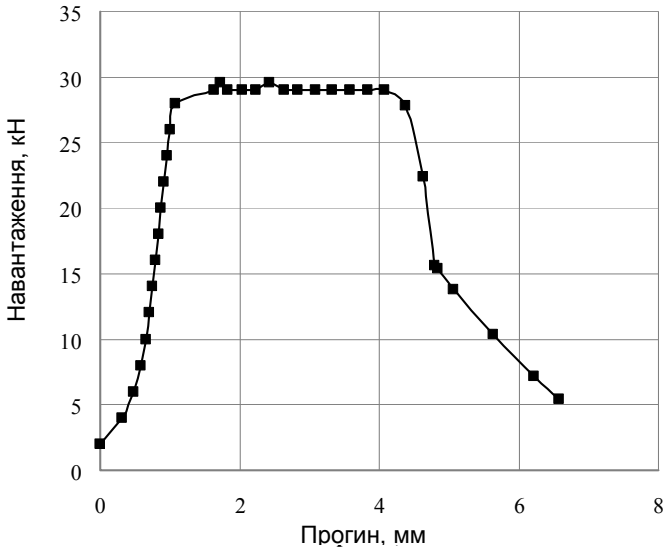
суміш для реакційно-порошкового бетону класу В80 і укладали її у форму. Заформований зразок твердів в нормальних умовах протягом 28 діб. Після цього зразок піддавали випробуванню на розтяг при згині за трьохточковою схемою (рис. 2.43), при цьому також будувалась діаграма навантаження – деформація.



**Рис. 2.43.** Випробування зразків на розтяг при згині за трьохточковою схемою

За результатами випробування побудована діаграма навантаження – деформація (рис. 2.44). Як видно, на діаграмі спостерігається суттєво виражене "плато" сталості навантаження при постійному зростанні деформації (прогину). Очевидно, це свідчить про наявність високих деформативно-пластичних властивостей у випробуваного зразка.

Для оцінки отриманого результату було виготовлено зразки аналогічних розмірів на РПБ та дрібнозернистому бетоні а також з різним вмістом сіток і сталевोї фібри (табл. 2.24).



**Рис. 2.44.** Діаграма навантаження-деформація для зразка РПБ з 10 сітками

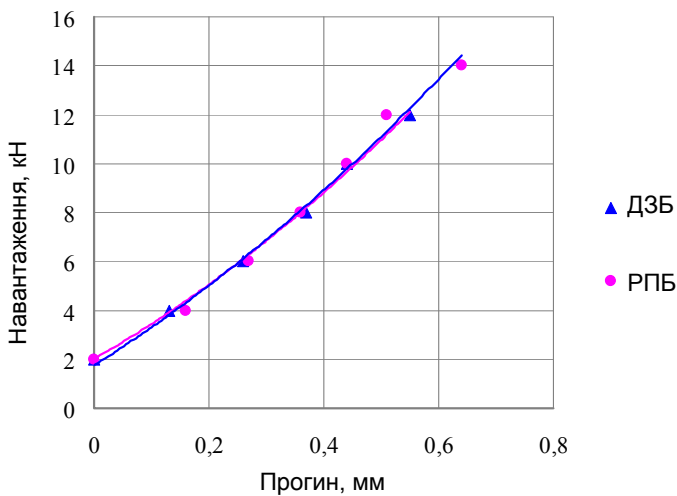
Таблиця 2.24

Дисперсне армування досліджуваних зразків

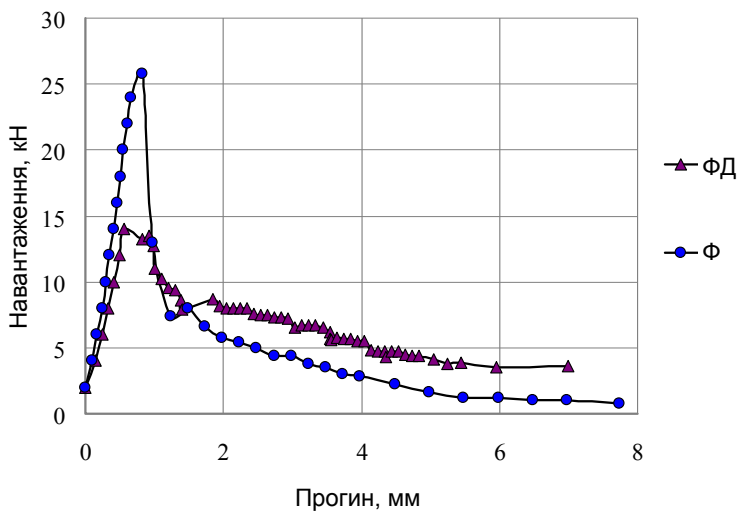
Зразки (маркування)	РПБ	ДЗБ	С-3	С-5	С-10	Ф	ФД	С- 5Ф
Бетон (матриця)*	РПБ	ДЗБ	РПБ	РПБ	РПБ	РПБ	ДЗБ	РПБ
К-сть сіток	—	—	3	5	10	—	—	5
Вміст сталі сіток, кг/м <sup>3</sup>	—	—	46	70	140	—	—	—
Вміст сталевोї фібри, кг/м <sup>3</sup>	—	—	—	—	—	140	140	70

\* ДЗБ – дрібнозернистий бетон; РПБ – реакційно-порошковий бетон





**Рис. 2.45.** Діаграма навантаження-деформація для зразків з дрібнозернистого та реакційно-порошкового бетону



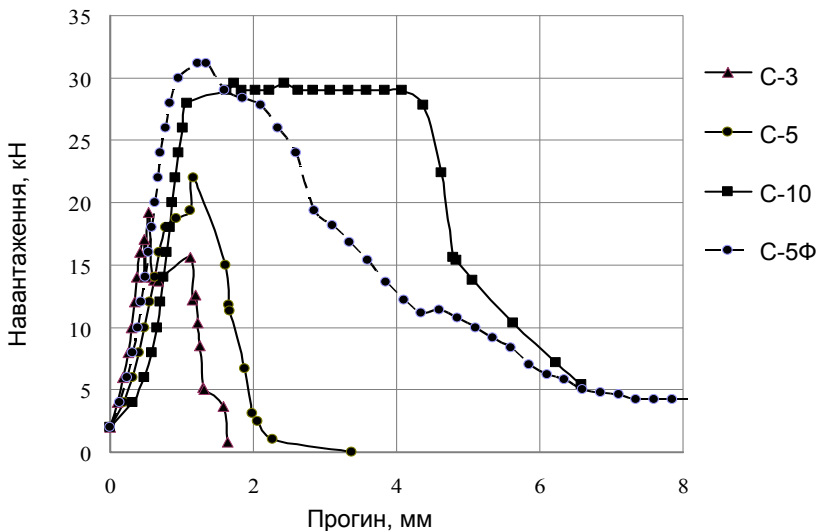
**Рис. 2.46.** Діаграма навантаження-деформація для зразків з дрібнозернистого та реакційно-порошкового фібробетону

Як показали результати випробувань, зразки без дисперсної арматури (рис. 2.45) показали досить низькі значення граничних деформацій (близько 0,6 мм, з деякою перевагою реакційно-порошкового бетону). Характер руйнування – крихкий, що відображено майже прямими лініями на діаграмі та спостерігалось візуально під час випробування.

Введення до складу реакційно-порошкового та дрібнозернистого бетонів сталеві фібри призводить до очікуваного зростання міцності на розтяг при згині, але головне – з'являються низхідні гілки на кривих деформацій (рис. 2.46). Це свідчить про покращення деформативних властивостей бетонів за рахунок дисперсного армування фіброю.

Найкращі результати в плані забезпечення високих деформативних властивостей бетонів показали зразки, що містили в собі арматуру у вигляді сіток (рис. 2.47). Максимальне руйнуюче навантаження зафіксовано у зразка, що містив 10 сіток і для нього ж характерне яскраво виражене "плато" сталості навантаження при постійному зростанні деформації. Також достатньо хороші результати продемонстрував зразок із 5-ма сітками та фіброю (зразок С-5Ф). Для нього зафіксоване значення міцності на розтяг при згині навіть вище ніж у зразка з 10-ма сітками (С-10), в той же час низхідні гілки деформацій на діаграмі суттєво відрізняється, не на користь варіанту комбінованого армування. Також відмінним є і характер руйнування. Зразок С-10 після випробування зовні виглядає найменш зруйнованим (рис. 2.48).

Позитивний ефект збільшення деформативності бетону завдяки використанню сталевих сіток в якості аналога упорядкованої дисперсної арматури досягається наступним чином. Сталеві сітки у масі бетону виступають аналогами фібри але, на відміну від неї, мають дві суттєві переваги: забезпечують можливість спільної роботи всього об'єму сталі при виникаючих напруженнях а також характеризуються правильною орієнтацією відносно діючим зовнішнім навантаженням. В результаті стає можливим суттєво підвищити міцність на розтяг при згині бетону та збільшити його пластичні деформації.



**Рис. 2.47.** Діаграма навантаження-деформація для зразків РПБ з різним вмістом сіток

За результатами додаткових досліджень встановлено, що оптимальними параметрами дисперсного армування сітками є наступні: діаметр стержнів сітки 0,8...1,2 мм; крок сітки 10...15 мм; відстань між окремими сітками 3...10 мм; вміст сіток в бетоні (за масою) 75...200 кг/м<sup>3</sup>.

Діаметр стержнів сіток приймається аналогічно до найбільш поширених діаметрів сталевих фібри. При діаметрі менше 0,8 мм необхідно збільшувати кількість сіток в перерізі виробу або конструкції, а при діаметрі понад 1,2 мм – збільшується загальна витрата сталі на об'єм бетону. Зменшення кроку сітки менше 10 мм збільшує витрату сталі і ускладнює процес формування виробу, а збільшення понад 15 мм знижує ефективність роботи армуючого компонента.

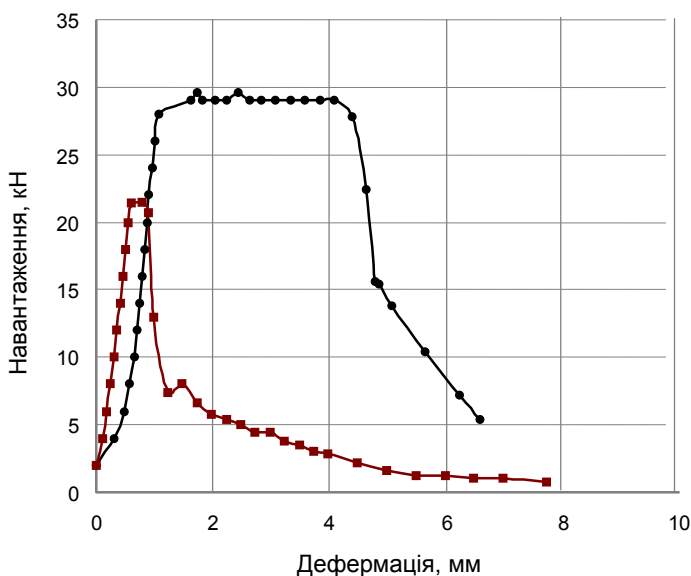
Зменшення відстані між окремими сітками менше 3 мм ускладнює процес їх фіксації в опалубці або формі, а також погіршує рівномірність розподілу бетонної суміші. Збільшення

відстані понад 10 мм призводить до появи ефекту «шаруватості» конструкції або виробу, що погіршує деформативні властивості.



**Рис. 2.48.** Зовнішній вигляд зразків після випробування  
(маркування зразків відповідно до табл. 2.24)

Вміст сіток за масою приймається відповідно до найбільш поширених витрат сталевих фібри в бетоні. Зменшення вмісту нижче  $75 \text{ кг/м}^3$  не забезпечує необхідних значень деформативних властивостей, а збільшення понад  $200 \text{ кг/м}^3$  приводить до суттєвого зростання вартості конструкції без відповідного збільшення деформативності.



**Рис. 2.49.** Діаграма навантаження-деформація  
 1 – реакційно-порошковий бетон з 10 сітками;  
 2 – реакційно-порошковий фібробетон

Для виявлення ефективності дисперсного армування сітками порівнюємо результати випробування зразка С-10 з 10 сітками і аналогічного за складом бетону зразком Ф з витратою фібри  $140 \text{ кг/м}^3$ , що відповідала витраті сталі в зразку С-10.

Як видно з наведеної нижче діаграми (рис. 2.49), зразок С-10 має міцність на розтяг при згині 32 МПа, що на 30% більше ніж у зразка, виготовленого із використанням фібри (25 МПа). Крім того, суттєво збільшуються пластичні деформації, що зростають майже в 5 раз (4...4,5 мм проти 0,5...1 мм), що відображено на діаграмі навантаження-деформація.

## Висновки до розділу II

1. На основі аналізу комплексу експериментально-статистичних моделей міцнісних параметрів реакційно-порошкових фібробетонів встановлено ефективність застосування сталеві мікрофібри, що має велику поверхню зчеплення з бетоном. Отримані кількісні залежності, що характеризують вплив водоцементного відношення та вмісту фібри на міцність РПФБ при стиску та розтяг при згині а також їх співвідношення. Показано, що застосування сталеві мікрофібри в реакційно-порошкових бетонах дозволяє підвищити коефіцієнт ефективності дисперсного армування (тобто співвідношення міцності на розтяг при згині до міцності при стиску на 30...40%).

2. Вивчена кінетика зростання міцності досліджуваних РПФБ і показано, що при В/Ц в межах 0,3...0,35 через 1 добу можливе досягнення до 50% від марочної міцності як при стиску, так і на розтяг при згині. При В/Ц < 0,3 марочна міцність РПФБ знаходиться в межах, характерних для високоміцних бетонів і складає понад 100 МПа при стиску і понад 25 на розтяг при згині.

3. На основі експериментальних досліджень, виконаних для цементів I і II-го типів Здолбунівського та Івано-Франківського цементних заводів, встановлено, що для отримання РПФБ можливим є застосування як бездобавочних цементів, так і цементів із добавкою шлаку до 35% (портландцементи II-го типу груп А і Б). В 1-добовому віці при застосуванні цементів I-го типу досягається більш висока міцність фібробетонів (до 15%) при стиску при однаковому значенні коефіцієнта дисперсного армування.

4. Показана можливість суттєвого збільшення ефективності введення до складу фібробетонних сумішей добавок суперпластифікаторів поліакрилатного та полікарбоксилатного типів. Середнє збільшення міцності фібробетонів при введенні таких добавок прямопропорційне їх водоредукуючому ефекту. Найбільший ефект збільшення міцності відзначено у випадку використання добавки

поліакрилатного типу Dynamon SP3 в кількості 1...1,5% від маси цементу.

5. За допомогою експериментально-статистичних моделей за умов забезпечення максимальних значень міцності на розтяг при згині і, відповідно, коефіцієнта ефективності дисперсного армування визначали оптимальний вміст сталеві фібри. Встановлено, що при застосуванні сталеві мікрофібри її оптимальний вміст в досліджуваних РПФБ з витратою цементу  $700 \text{ кг/м}^3$  при однаковій рухомості (20...25 см) складає  $180...200 \text{ кг/м}^3$  ( $\varphi = 2,3...2,5\%$ ). При оптимальних значеннях вмісту фібри коефіцієнт ефективності дисперсного армування збільшується на 50...60%.

6. Виконані порівняльні дослідження способів введення фібри в бетонну суміш: з попереднім введенням в суху суміш а також із введенням в готову бетонну суміш. Встановлена можливість застосування обох методів введення фібри. При достатній тривалості та інтенсивності перемішування міцнісні параметри РПФБ, отриманих при двох способах введення, відрізняються несуттєво. Вибір методу введення фібри повинен враховувати конкретні технологічні можливості даного підприємства. Однорідність розподілення фібри в бетонній суміші залежить в першу чергу від її рухомості. Найбільша однорідність розподілення для РПФБ досягається при застосуванні високорухливих бетонних сумішей з  $OK \geq 20 \text{ см}$ .

7. Проведені порівняльні дослідження впливу виду та складу реакційно-порошкового бетону на міцнісні властивості РПФБ. Показано ефективність використання різних активних дисперсних наповнювачів. Найкращими міцнісними характеристиками відзначається реакційно-порошковий фібробетон, що містить тонкомелений наповнювач у вигляді композиції зола + метакаолін. Середнє значення міцності при стиску у віці 28 діб для такого складу склало близько 140 МПа а міцності при згині – понад 35 МПа. Співвідношення  $f_{cm}/f_{c,tf}$  для РПФБ при вмісті фібри 1,54% об. складає 4,6...5,9, а при вмісті 3,08% – 3,9...4,8 порівняно із 6,5 – для РПБ.

8. Експериментально встановлено можливість одержання полідисперсно армованого РПФБ з використанням сталеві та

базальтової фібри. При використанні базальтової фібри з довжиною волокон 12 мм в кількості 2...4 кг/м<sup>3</sup> зафіксоване середнє зростання міцності на розтяг при згині 10...20% у порівнянні із складами фібробетонів що не містили неметалічну фібру. Використання базальтової фібри з довжиною волокон 24 мм показало дещо гірші результати, що обумовлено зменшенням процентного вмісту волокна в площині перетину руйнування а також гіршим розподіленням в масиві фібробетону.

9. На основі аналізу комплексу експериментально-статистичних моделей міцнісних параметрів РПФБ з композиційним дисперсним армуванням встановлено ефективність застосування базальтової фібри довжиною волокон 12 мм в комплексі з хвилястою сталевую фіброю, в оптимальних співвідношеннях. Отримані кількісні залежності, що характеризують вплив водоцементного відношення, витрат цементу, вмісту сталеві та базальтової фібри на міцність композиційних РПФБ при стиску та розтяг при згині а також їх співвідношення. Отримано залежність вмісту добавки суперпластифікатора Dypamon SP3 від тих же факторів, що дозволяє отримувати у всіх випадках рівнорухомі фібробетонні суміші.

10. Отримані експериментально-розрахункові залежності водопотреби РПФБ сумішей при використанні різних водоредукуючих добавок, в широкому діапазоні рухомості бетонних сумішей. Вивчена кінетика зміни рухомості РПФБ сумішей. Досліджені діапазони зміни рухомості з врахуванням факторів, що характеризують їх склад а також при введенні суперпластифікуючих добавок. Показано, що при оптимізації складу фібробетонних сумішей їх рухомість може залишатись практично стабільною протягом 0,5...1 год.

11. Вивчено вплив рухомості бетонної суміші та тривалості її віброущільнення на коефіцієнт розшарування (однорідності). Показано, що для РПФБ з композиційним дисперсним армуванням при однаковій тривалості віброущільнення розшарування є меншим, ніж для мноармованого РПФБ. Експериментально підтверджено висловлену раніше гіпотезу про можливість уникнення або



суттєвого зменшення розшарування фібробетонних сумішей і підвищення однорідності структури фібробетонів за рахунок композиційного дисперсного армування.

12. Вивчено комплекс властивостей фібробетонів, що характеризують особливості їх структури. Показники, що характеризують середній розмір пор та однорідність порового простору РПФБ суттєво покращуються при введенні добавок суперпластифікаторів, особливо полікарбоксилатного типу. Введення суперпластифікатора Melflux 2651F дозволяє зменшити водопоглинання на 30...40%, що корелює з їх водоредукуючим ефектом. Найкращі характеристики пористості проявляють РПФБ з композиційним дисперсним армуванням.

13. Отримані експериментальні дані по визначенню усадки свідчать, що усадочні деформації РПФБ, як і у випадку звичайних фібробетонів, залежать від вмісту бетонної суміші але, крім того, суттєвим фактором є також витрата фібри. Відзначено, що більший вміст фібри в РПФБ з композиційним дисперсним армуванням нівелює його підвищену водопотребу. Зменшення усадочних деформацій і збільшення міцності на розтяг при згині таких бетонів приводить до відповідного збільшення модуля тріщиностійкості.

14. Дисперсне армування реакційно-порошкового бетону можна розглядати як додатковий чинник, поряд із зменшеною капілярною пористістю, що додатково впливає на морозостійкість. Експериментальні дослідження показали, що для полідисперсно-армованих фібробетонів при витраті фібри  $200 \text{ кг/м}^3$  досягається морозостійкість 600...800. Встановлено, що полікарбоксилатні та поліакрилатні суперпластифікатори дозволяють отримувати РПФБ із морозостійкістю 800 і більше циклів.

15. Збільшення значень деформативних властивостей бетону, а саме границі міцності на розтяг при згині та граничних деформацій бетону можна досягнути, якщо використовувати в якості дисперсного армуючого компонента, сталеві сітки, які розташовують в бетоні перпендикулярно діючим навантаженням (паралельно виникаючим розтягуючим напруженням). Сталеві сітки у масі бетону виступають

аналогами фібри але, на відміну від неї, мають дві суттєві переваги: забезпечують можливість спільної роботи всього об'єму сталі при виникаючих напруженнях а також характеризуються правильною орієнтацією відносно діючим зовнішнім навантаженням. Такий спосіб дисперсного армування дозволяє збільшити пластичні деформації РПБ майже в 5 раз.

### Література до розділу II (п. 6-7)

1. Калашников В. И., Демьянова В. С., Володин В. М., Гусев А. Д. Ресурсосберегающие порошковые фибробетоны с использованием техногенных отходов. Строительные материалы. 2012. № 8. С. 52–54.
2. Свойства волокон и бетона, армированного волокнами. Строительство и архитектура: реф. информ. (ЦИНИС). М., 1974. Вып. 14. С. 12–15. Сер. 7. (Строительные изделия и конструкции).
3. Прочность на излом бетона, армированного волокнами. *Строительство и архитектура*: реф. информ. (ЦИНИС). М., 1980. Вып. 10. С. 4–6.
4. Аболинын Д. С., Кравинскис В. К. Сопротивление фибробетона изгибу и растяжению. *Расчет и оптимизация строительных конструкций*. Рига, 1974. С. 47–54.
5. Рыбасов В. П. Исследование свойств бетона, армированного стальными волокнами. *Новые материалы и изделия в строительстве*. М., 1982. С. 36–38.
6. Курбатов Л. Г., Рабинович Ф. Н. Об эффективности бетонов, армированных стальными фибрами. *Бетон и железобетон*. 1980. № 3. С. 6–8.
7. Holschemacher K, Mueller T and Ribakov Y (2010). Effect of steel fibers on mechanical properties of high-strength concrete. *Materials and Design*, 31, pp. 2604–2615.
8. Yoo D-Y and Banthia N (2016). Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 73, pp. 267–280.
9. Курбатов Л. Г., Романов В. П. Некоторые вопросы проектирования и экономики конструкций, армированных

- стальными фибрами / фибробетон и его применение в строительстве : сб. научн. тр. М. : НИИЖБ, 1979. 173 с.
10. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсноармированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции : монография М. : Издательство АСВ, 2004. 201 с.
  11. Maha M.S. Ridhaa, Kaiss F. Sarsama, Ihsan A.S. Al-Shaarbaf. Experimental Study and Shear Strength Prediction for Reactive Powder Concrete Beams. *Construction Materials* 8 (2018) 434–446.
  12. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Житковський В. В. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту. Рівне : НУВГП, 2011. 174 с.
  13. Пухаренко, Ю. В., Аубакирова И. У., Голубев В. Ю. Проектирование состава и исследование свойств высокопрочного. *Популярное бетоноведение 2009* : III третья международная выставка-конференция : сб. докл., 2009. С. 74–79.
  14. Баженов, Ю. М., Фаликман В. Р. Новый век: новые эффективные бетоны и технологии. *Материалы I Всероссийской конференции по бетону и железобетону*. М., 2001. С. 91–101.
  15. Пухаренко Ю. В. Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов : дис. ... д-ра. техн. наук. Санкт Петербург, 2004. 315. с.
  16. К вопросу применения нескольких видов фибр для дисперсно армированных бетонов / Ключев С. В., Лесовик Р. В., Ключев А. В., Бондаренко Д. О. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. № 94. 2012. С. 81–83.
  17. Пухаренко Ю. В., Аубакирова И. У. Полидисперсное армирование строительных композитов – фибробетонов. *Технологии бетонов*. 2011, № 1–2. С. 28–29.
  18. Голанцев В. А. Свойства и особенности полиармированных фибробетонов: дис. ... канд. техн. наук. Л., 1990. 214 с.

19. Мелкозернистый фибробетон армированный полипропиленовым волокном / Ключев А. В., Ключев С. В., Дураченко А. В., Нетребенко А. В. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. № 4. 2014. С. 67–72.
20. Пухаренко Ю. В., Голубев В. Ю. Высокопрочный сталефибробетон. *Промышленное и гражданское строительство*. 2007. № 9. С. 40–41.
21. Дорф В. А., Красновский Р. О. Влияние содержания и характеристик фибры на коэффициент истираемости сталефибробетона с цементно-песчаной матрицей. *Технологии бетонов*. 2013. № 12. С. 40–42.
22. Волков, И. В., Беляева В. А. Сталефибробетонные конструкции зданий и сооружений. *Обзорная информация*. М. : ВНИИТПИ. 1990. 59 с.
23. DBV-Merkblatt. Stalfaserbeton. DeutscherBeton – und Bautechnik-Verein. 2001. 77 s.
24. СТО НОСТРОЙ 2.27.125–2013. Конструкции транспортных тоннелей из фибробетона. Правила проектирования и производства работ. Москва. 2012. 117 с.
25. Шейкин А. Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня. М. : Стройиздат, 1974. 192 с.
26. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Основы бетоноведения. С.Пб : СтройБетон, 2006. 692 с.
27. Баженов, Ю. М. Технология. М. : Изд-во АСВ, 2002. 500 с.
28. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. *Теория и практика*. М. : 1992. Вып. 2.
29. Капустин Д. Е. Прочностные и деформационные характеристики несъемной сталефибробетонной опалубки как несущего элемента железобетонных конструкций: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2015.
30. Баженов Ю. М. Бетонополимеры. М. : Стройиздат, 1983. 472 с.
31. Калашников В. И., Демьянова В. С., Володин В. М., Гусев А. Д. Ресурсосберегающие порошковые фибробетоны с использованием техногенных отходов. *Строительные материалы*. 2012, № 8. С. 52–54.

## **РОЗДІЛ III**

### **БУДІВЕЛЬНІ СУМІШІ НА ОСНОВІ РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВИХ БЕТОНІВ**

#### **3.1. Реакційно-порошкові бетони як напівфабрикат для виготовлення сухих будівельних сумішей (СБС) для розчинів різного призначення**

##### **3.1.1. Передумови використання РПБ у будівельних сумішах**

Сухі будівельні суміші (СБС) стають все більше актуальними в будівництві завдяки ряду переваг у порівнянні із товарними розчиновими сумішами. В ряді випадків, стає неефективною експлуатація великих заводів з виробництва товарних розчинових сумішей внаслідок підвищення транспортних витрат. Використання СБС сприяє підвищенню продуктивності праці і якості робіт, зниженню витрат на транспортування і зберігання, скороченню технологічних операцій. Можливість управління основними властивостями СБС шляхом зміни вмісту різних компонентів створює широкий асортимент необхідних для зведення споруд матеріалів і тим самим дозволяє використовувати їх при виконанні всіх видів робіт.

При зведенні будівель і споруд виникає необхідність в сумішах різного призначення. Виготовлення таких сумішей можливе централізовано на заводах або безпосередньо на будівельних майданчиках з застосуванням напівфабрикатів. В якості такого напівфабрикату може бути використаний реакційно-порошковий бетон (РПБ). РПБ – можна розглядати, як суху суміш, що містить в'язуче (портландцемент), дисперсний наповнювач (дрібний пісок, зола та інші) і суперпластифікатор, а також добавки-модифікатори (мікрокремнезем, метаколін та інші). Ці суміші забезпечують високу міцність, адгезійну здатність та довговічність бетонів та розчинів у різних умовах експлуатації. Коректуючи склади РПБ різними компонентами можна досягати властивостей сухих сумішей, розчинів та бетонів різного призначення.

В попередньому розділі наведені та проаналізовані типові склади РПБ з яких найбільш доступними і ефективними є склади, що наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Типові склади РПБ та їх міцнісні характеристики

№	Склад, кг/м <sup>3</sup> *							СП	РК, см	Міцність РПБ, МПа					
										на згин, у віці			на стиск, у віці		
										1 до- ба	7 діб	28 діб	1 до ба	7 діб	28 діб
1	1000	1000	-	-	-	-	200	MEFLUX 2651 (0,5% від цем)	25	9,2	30,5	30,5	57,2	71,4	98,0
2	900	1000	-	100	-	-	200		30	8,5	25,1	19,6	56,0	69,4	101,6
3	700	1000	-	300	-	-	200		30	9,8	20,9	14,9	47,0	72,8	96,4
4	900	1000	100	-	-	-	210		10	9,9	23,2	15,6	51,8	73,6	93,0
5	700	1000	300	-	-	-	200		25	9,2	23,9	12,5	40,2	70,2	90,2
6	900	1000	-	-	100	-	200		15	9,2	23,4	22,3	51,8	92,6	98,4
7	700	1000	-	-	300	-	200		30	8,8	17,6	20,3	37,4	90,0	102,0
8	900	1000	-	-	-	100	200		30	9,5	21,6	14,5	46,6	79,0	87,2
9	700	1000	-	-	-	300	200		30	7,6	17,1	13,3	36,8	77,0	99,0

\* - Ц – портландцемент, П – пісок фракції 0.16...1,25, ГП – гранітний аспіраційний пил, МП – мелений пісок, ДГШ – доменний гранульований шлак, З – зола-виносу.

В сухі суміші доцільно вводити поліакрилатні або полікарбоксилатні суперпластифікатори зокрема «Melflux 2651F».

На основі пропонованих складів РПБ можливим є отримання сухих будівельних сумішей різного складу та функціонального призначення. Зокрема:

- сумішей для захисного («бронювального») шару конструкцій,
- сумішей для ремонту та поновлення поверхонь та споруд (PM1, PM2, PM3);
- мурувальних сумішей для улаштування теплозберігаючих огорожувальних конструкцій (MP 4);

- сумішей для улаштування стяжок та покриттів підлог (СТ1, СТ2, СТ3, ПО1, ПО2, ПО3);
- сумішей для штукатурення теплоізоляційними розчинами (ШТ3);
- гідроізоляційних сумішей для улаштування жорсткої, еластичної та гідроізоляції систем теплоізоляції (ГП1, ГП2, ГП3),
- сумішей для зведення споруд 3D-принтером та ін.

Вимоги до перерахованих сумішей, для яких за ДСТУ нормуються властивості, наведені в табл. 8.2.

Як вихідні матеріали для отримання СБС були використані:

- РПБ характеристики компонентів якого наведені в попередніх розділах;

- кварцовий пісок фракції 0,16...1,25, Славутського кар'єру (Хмельницька обл.) з модулем крупності  $M_{кр} - 1,6...1,9$ ;

- керамзит Яворівського заводу будівельних матеріалів, фракція 0...5 мм, насипна густина  $690 \text{ кг/м}^3$  (марка 700), водопоглинання – 14,5%, міцність при стиску у циліндрі – 3,6 МПа (марка П150);

- перлітовий пісок фракція 0,16...1,25 мм, насипна густина  $95 \text{ кг/м}^3$  (марка 100);

- спінені полістирольні гранули ТзОВ ПП «Ізотерм-С» розміром 3-5 мм, насипна густина  $10,5 \text{ кг/м}^3$ ; густина зерен –  $15,5 \text{ кг/м}^3$ ;

- суперпластифікуюча добавка «Melflux 2651F»;

- редиспергований полімерний порошок (РПП)

- Neolith P 4400 (вініловий ефір версатісвої кислоти) FAR SPA (Італія),

- Dairen DA 1400 (сополімер – вінілацетат-етилен) DCC (Тайвань),

- ПВА – полімер вінілацетату.

Таблиця 3.2

## Вимоги до розчинових сумішей та розчинів на їх основі

Назва показника	Значення показників для сумішей													
	МР4	СТ1	СТ2	СТ3	ПО1	ПО2	ПО3	РМ1	РМ2	РМ3	ШТ3	Г11	Г1 2	Г1 3
Суміші														
Крупність заповнювача, мм, не більше	2,5	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	4,0	2,5	1,25	1,25	1,25	0,63	0,63	0,63
Розчинові суміші														
Рухомість, см, не менше	6	8	8	8	-	-	-				8			
Розтічність, см, не менше	-	-	-	-	17	17	-				-			
Термін придатності, хв, не менше	60	20	20	20	20	20	-	30	30	30	60	60	120	120
Розчини														
Міцність зчеплення після витримування в повітряно-сухих умовах , МПа, не менше	0,2	0,2	0,5	0,5	1,0	1,0	1,5	2,0	2,0	0,8		1,0	0,5	0,08 ПП*, 0,015 МВ*
Границя міцності на стиск, МПа, не менше: -через три доби -через 28 діб		5 15	5 20	10 35	7 25	10 35	20 50	5,0 35,0	6,0 30,0	4,0 20,0				
	5										2,5	12	-	4



продовження табл.3.2

Назва показника	Значення показників для сумішей													
	МР4	СТ1	СТ2	СТ3	ПО1	ПО2	ПО3	РМ1	РМ2	РМ3	ШТЗ	Г11	Г1 2	Г1 3
Границя міцності на розтяг при згині через 28 діб, МПа, не менше		3,5	4,5	6,0	5,0	5,0	7,0	5,0	5,0	5,0	1,2			
Стираність, г/см <sup>2</sup> , не більше		-	-	-	0,7	0,7	0,7							
Усадка, мм/м, не більше		2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,2	1,2	2,0		2	-	-
Морозостійкість, циклів, не менше	25-75	-	-	50	-	75	75	75	75	-		50	50	50
Теплопровідність, Вт/(м·К), не більше	0,35										0,3			
Водопоглинання за 24 год, кг/м <sup>2</sup> , не більше											0,8	-	-	0,6
Паропроникність, мг/м·год·Па, не менше											0,1	0,03	-	0,1 МВ,* 0,04 ПП*
Тріщиностійкість	Відсутність тріщин на шарі товщиною, яка дорівнює максимально рекомендованій товщині нанесення за один прохід (додаток А)													

Примітка - \* ПП – пінополістирол, МВ – мінеральна вата.

### 3.1.2. Дослідження впливу виду редиспергованого полімеру на властивості СБС

При замішуванні сухої суміші у воді редисперговані полімерні порошки перетворюються в клейову полімерну дисперсію, яка при затвердінні розчину створює «гумові містки» в його порах і на межі з основою. Вони мають міцність при розриві не менше 5 МПа [1] і еластично армують цементний камінь, а також здатні не тільки суттєво збільшити адгезію розчинів до основи, але і значно згладити такі недоліки цементного каменю, як підвищену крихкість, низьку граничну розтяжність, схильність до утворення тріщин, малий опір динамічним навантаженням. Варто відзначити, що полімер хімічно не взаємодіє з в'язкими і іншими компонентами, а лише виконує роль гнучких зв'язків, надаючи штучному каменю підвищену еластичність. За допомогою дисперсних порошоків сухим сумішам надаються і деякі спеціальні властивості [2; 3].

На першому етапі дослідження проводили порівняння впливу редиспергованих полімерних порошоків (РПП) різної природи Neolith P 4400 (вініловий ефір версатієвої кислоти), Dairen DA 1400 (сополімер - вінілацетат-етилен) та ПВА. При цьому розчини отримували шляхом перемішування суміші РПБ, піску, полімеру та води. Склад РПБ в даному і послідовних випадках був наступний: ПЦ-I – 35%, зола-виносу – 15%, пісок фр. 0,16...1,25мм – 50%, суперпластифікатор MELFLUX 2651F 0,5% (від маси цементу). Частка полімеру складала 0, 10 та 20% від маси РПБ, В/Ц було сталим в кожній точці та становило 0,48. Склади досліджуваних СБС на основі РПБ з використанням РПП приведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Склади досліджуваних сумішей на основі РПБ

№	Тип полімеру	Склад сухої суміші, % мас			Вода замішування, %
		РПП	РПБ	Пісок	
1	-	0	50	50	12
2	Neolith P	2,5	50	47,5	12
3	4400	5,0	50	45	12

продовження табл. 3.3

№	Тип полімеру	Склад сухої суміші, % мас			Вода замішування, %
		РПП	РПБ	Пісок	
4	Dairen	2,5	50	47,5	12
5	DA 1400	5,0	50	45	12
6	ПВА	2,5	50	47,5	12
7		5,0	50	45	12

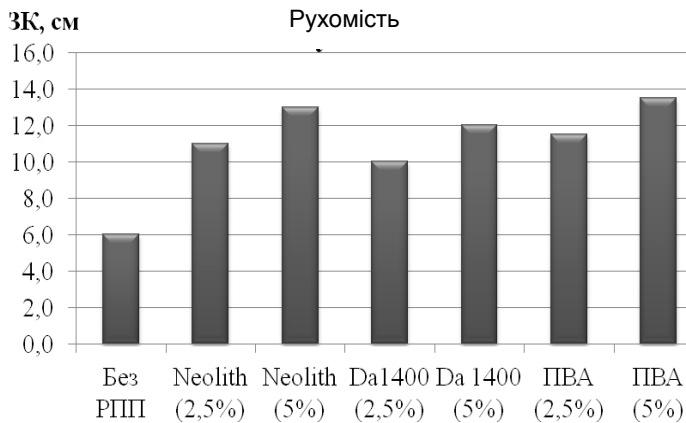
Рухомість розчинових сумішей визначали за зануренням стандартного конусу, границю міцності на розтяг при згині та границю міцності на стиск розчину визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-239 у віці 1, 3 та 28 діб, при використанні зразків призм розміром (40x40x160 мм), які тверднули у повітряно-сухих умовах. Отримані експериментальні результати приведені в табл. 3.4 та на рис. 3.1...3.3.

Таблиця 3.4

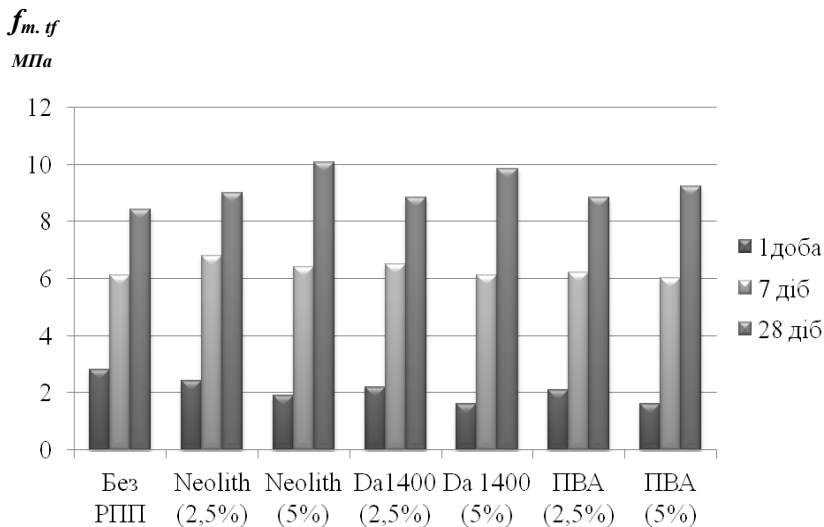
Результати випробувань впливу РПП на властивості розчинів

№	ЗК, см	Міцність при згині, МПа, у віці			Міцність при стиску, МПа, у віці		
		1 доба	7 діб	28 діб	1 доба	7 діб	28 діб
1	6,0	2,8	6,1	8,4	6,2	25,9	40,2
2	11,0	2,4	6,8	9,0	5,4	18,4	37,4
3	13,0	1,9	6,3	10,1	4,2	15	32,6
4	10,0	2,2	6,5	8,8	4,9	18,4	36,6
5	12,0	1,6	5,9	9,8	3,8	15	32,2
6	11,5	2,1	6,2	8,8	4,6	18,4	37,0
7	13,5	1,6	5,1	9,2	3,4	15	31,8

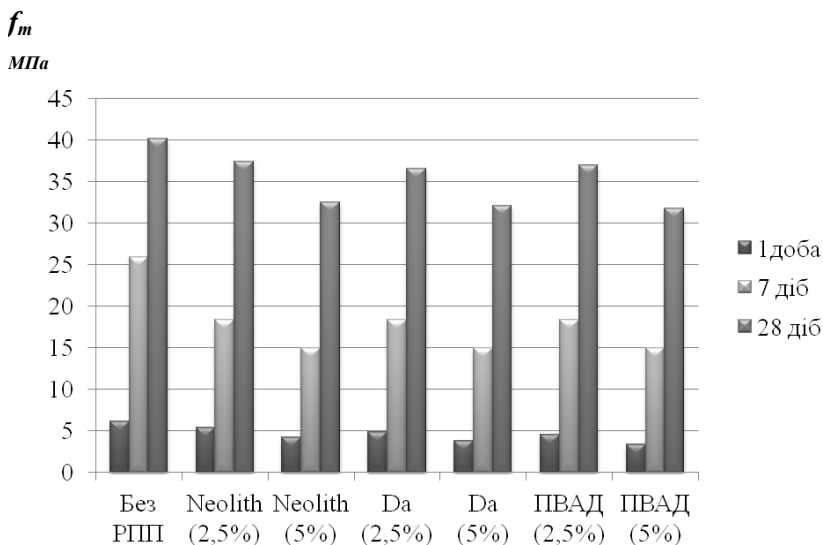
Аналізуючи отримані результати можна прийти до висновків, що введення РПП спричиняє значне збільшення рухомості розчинової суміші по зануренню конуса (ЗК) з 6 см до 10...11,5 см при постійній водопотребі та вмісті полімеру 2,5% від маси суміші. При подальшому підвищенні кількості РПП та ПВА до 5% спостерігаємо незначне збільшення рухомості до 12...13,5 см (рис. 3.1).



**Рис. 3.1.** Рухомість розчинів при використанні РПП



**Рис. 3.2.** Міцність розчинів на згин ( $f_{m. зг}$ ) при використанні РПП



**Рис. 3.3.** Міцність розчинів на стиск ( $f_m$ ) при використанні РПП

Полімерні порошки мають неоднозначний вплив на міцність як на стиск так і на згин у різні терміни твердіння. Згідно отриманих даних (табл. 3.4. та рис. 3.2, 3.3) введення полімерів усіх видів уповільнює твердіння на ранніх стадіях, як при згині так і при стиску. Причому при наближенні до 28 добового віку РПП чинять позитивний вплив. Міцність при згині у віці 28 діб зростає у порівнянні з складом без полімерної добавки на 8...12% при частці РПП 2,5% та на 8...12% і 10...15% у віці 7 та 28 діб відповідно при збільшенні добавки до 5%. Найвищі результати (10,1 МПа) отримані при використанні РПП Neolith Р 4400 у кількості 5% від маси СБС.

Вплив РПП на міцність при стиску є дещо іншим. Він чинить здебільшого негативний вплив, при помірних дозуваннях (до 2,5%) в віці 28 діб міцність падає на 7...10%. За подальшого зростання вмісту полімеру (до 5%) в композиції міцність останньої знижується на 16...20%. Вплив на ранню

міцність, у порівнянні з марочною, є більш вагомим і супроводжується суттєвим спадом міцності на 35...45% у порівнянні з зразком без полімерної добавки.

Подальші дослідження проводили з використанням РПП Neolith P 4400.

### **3.1.3. Ремонтні суміші на основі РПБ**

Під час експлуатації бетонні та залізобетонні конструкції і споруди піддаються дії агресивних середовищ, сейсмічним, ударним та іншим руйнівним впливам, які можуть викликати пошкодження і руйнування будівельних конструкцій [4, 5]. З кожним роком кількість бетонних і залізобетонних споруд, що руйнуються зростає, що призводить до необхідності створення методів і матеріалів для їх відновлення та захисту від агресивного навколишнього середовища.

Необхідність ремонту і захисту бетонних конструкцій визначається умовами експлуатації і термінами служби бетону, залізобетонних конструкцій і виробів.

Для збільшення терміну служби будівельних конструкцій застосовують дві групи методів захисту. До першої групи відносяться всі способи захисту поверхні будівельних конструкцій. До другої групи належать всі способи і методи по створенню більш довговічного матеріалу будівельних конструкцій.

В теперішній час для поверхневого захисту матеріали на мінеральній основі знаходять все більше застосування за рахунок їх переваг перед матеріалами на органічному в'язучому. Серед переваг мінеральних матеріалів слід відзначити такі якості, як високу міцність, морозостійкість, адгезію, паропроникність, стійкість до впливу агресивних середовищ і нескладну технологія нанесення.

Однак будівельні суміші на мінеральній основі мають певні недоліки у тому числі необхідність тривалого догляду за твердіючою сумішшю (протягом 10-14 діб), що призводить до додаткових трудових і енергетичних витрат; неможливість їх використання при термінових ремонтних роботах.

Для усунення перерахованих вище недоліків ремонтних та захисних матеріалів на мінеральній основі були запропоновані склади СБС на основі реакційно-порошкових бетонів.

Отримання необхідних складів сухих будівельних сумішей виконувалося шляхом додавання до базової рецептури РПБ (ПЦ-35%, зола-виносу – 15%, пісок фр. 0,15...0,63 – 50%, суперпластифікатор 0,5% від цементу) компонентів залежно від призначення та необхідних характеристик СБС.

Для вивчення впливу факторів складу сумішей на основні властивості будівельних розчинів були виконані алгоритмізовані експерименти відповідно до тривірневого трьохфакторного плану  $B_3$  [6]. Умови планування експериментів наведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Умови планування експериментів при дослідженні  
ремонтних сумішей на основі РПБ

Фактори впливу		Рівні варіювання			Інтервал
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Вміст РПБ, кг/т	$X_1$	500	650	800	150
Вміст золи, кг/т	$X_2$	0	50	100	50
Вміст РПП, кг/т	$X_3$	0	10	20	10

Як вихідні параметри вибрано рухомість розчинової суміші, водопоглинання, усадку, міцність при стиску, згині у віці 1, 7 та 28 діб зразків, які тверднули у повітряно-сухих умовах та адгезійну міцність розчинів. Випробування проводили згідно з чинними нормативними документами ДСТУ Б В.2.7-239 та ДСТУ Б В.2.7-126-2011.

Матриця планування та отримані експериментальні результати досліджень наведені в табл. 3.6 та табл. 3.7 відповідно. У ході досліджень в кожній точці виготовляли розчини на основі РПБ з постійно водопотребою, що становила 120л/т сухої суміші.

Таблиця 3.6

Матриця планування досліджень ремонтних сумішей

Точка плану	Кодовані значення факторів			Склад розчину, кг/т				
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	РПБ	3	РПП	Пісок	Вода
1	1	1	1	800	100	0	100	120
2	1	1	-1	800	100	20	80	120
3	1	-1	1	800	0	0	200	120
4	1	-1	-1	800	0	20	180	120
5	-1	1	1	400	100	0	500	120
6	-1	1	-1	400	100	20	480	120
7	-1	-1	1	400	0	0	600	120
8	-1	-1	-1	400	0	20	580	120
9	1	0	0	800	50	10	140	120
10	-1	0	0	400	50	10	540	120
11	0	1	0	650	100	10	240	120
12	0	-1	0	650	0	10	340	120
13	0	0	1	650	50	0	300	120
14	0	0	-1	650	50	20	280	120
15	0	0	0	650	50	10	290	120
16	0	0	0	650	50	10	290	120
17	0	0	0	650	50	10	290	120

Таблиця 3.7

Експериментальні результати досліджень ремонтних  
СБС на основі РПБ

Точка плану	ЗК, см	Густина $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	Водопоглинання W, %	Міцність на згин, МПа, у віці діб			Міцність на стиск, МПа, у віці діб			Адгезія, МПа
				1	7	28	1	7	28	
1	12,8	2320	0,9	6,29	14,52	18,7	41,4	51,4	73,1	2,49
2	8,4	2410	1,5	7,09	14,08	16,6	49,8	66,6	82,6	0,73
3	10,8	2230	2,1	5,49	12,1	16,8	28,8	39,2	59,9	2,19
4	5,4	2320	2,8	5,89	11,44	14,1	40,4	46,9	70,0	0,59



продовження табл. 3.7

Точка плану	ЗК, см	Густина $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	Водопоглинання W, %	Міцність на згин, МПа, у віці діб			Міцність на стиск, МПа, у віці діб			Адгезія, МПа
				1	7	28	1	7	28	
5	14,3	2272	1,4	3,49	9,57	13,9	13,5	27,6	40,7	1,79
6	10,5	2350	3,5	5,89	7	7,4	32,2	33	46,6	0,41
7	13,5	2110	2,6	3,09	8,8	13,5	11,5	24,3	36,3	1,53
8	8,7	2200	3,9	5,09	6, 1	6,4	20,8	35	42,8	0,33
9	10,5	2300	1,6	6,64	13,2	17,3	38,8	52,1	69,7	1,20
10	12,9	2223	2,7	4,84	8,69	11,1	18,8	28,2	39,9	0,55
11	12,2	2316	1,8	5,64	11,88	16	28,9	43	60,6	1,10
12	10,3	2160	3,0	4,84	10,78	14,5	23,1	39,7	52,1	0,90
13	11,8	2233	1,6	4,49	11,99	16,6	20,1	40,6	53,4	2,10
14	7,2	2330	2,7	5,89	10,12	12	36,8	42,6	61,4	0,40
15	10,9	2285	2,0	5,44	11,11	15,2	24,3	41	56,0	1,10
16	11,0	2280	2,2	5,5	11,55	15,2	25	41,2	57,3	0,95
17	10,5	2290	2,1	5,3	11,22	15,1	25,3	42	56,9	1,00

Статистична обробка експериментальних даних дозволила отримати коефіцієнти рівнянь регресії рухомості, водопоглинання, середньої густини, міцності при стиску та згині, а також адгезійної здатності досліджуваних розчинових сумішей та розчинів, які наведені в табл. 3.8.

Аналізуючи коефіцієнти рівнянь регресії рухомості сумішей по зануренню конуса (табл. 3.8) досліджені фактори можна розмістити по величині впливу в наступний спадаючий ряд  $X_3 > X_2 > X_1$ , також спостерігається несуттєвий вплив ефектів взаємодії цих факторів. При цьому підвищення вмісту РПП та золи має позитивний ефект, а збільшення кількості РПБ навпаки. Аналіз взаємодій коефіцієнтів рівнянь однозначно показує, що при збільшенні кількості РПБ в поєднанні зі зменшенням частки золи має місце деяке падіння рухомості. Позитивно на рухомість розчинових сумішей впливає спільне збільшення витрат РПП і золи.

Таблиця 3.8

## Коефіцієнти рівнянь регресії

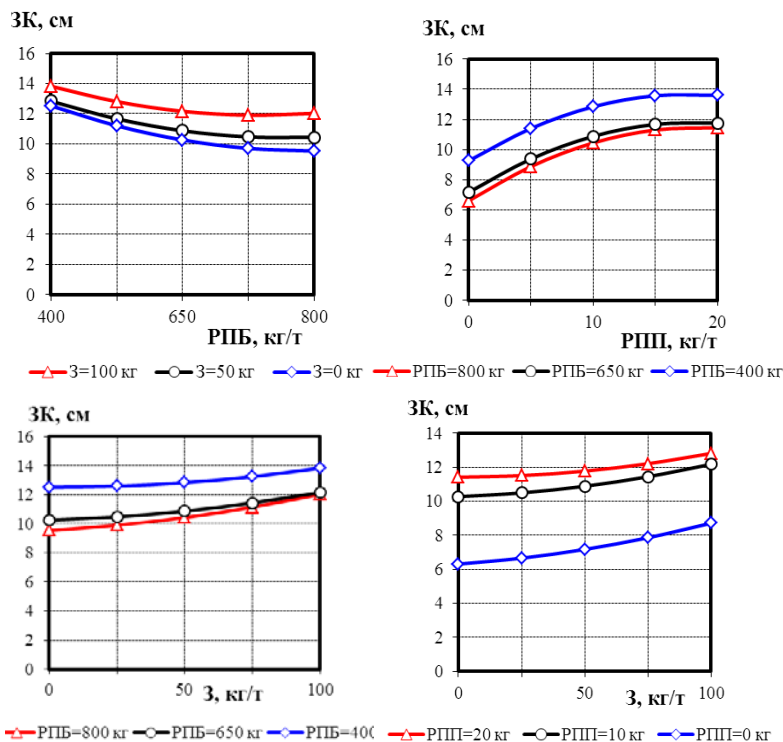
Коефіцієнти	Рухомість ЗК, см	Середня густина розчину $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	Водопоглинання, W, %	Міцність на згин, МПа, у віці			Міцність на стиск, МПа, у віці			Адгезія, МПа
				1 доба	7 діб	28 діб	1 доба	7 діб	28 діб	
B <sub>0</sub>	10,87	2275	2,12	5,44	11,4	15,15	25,77	41,7	56	0,98
B <sub>1</sub>	-1,2	42,5	-0,53	0,9	2,40	3,12	10,24	11,81	14,9	0,26
B <sub>2</sub>	0,95	44,8	-0,53	0,4	0,78	0,74	4,12	4,66	4,25	0,1
B <sub>3</sub>	2,3	-44,5	-0,57	-0,7	0,70	2,30	-6,47	-3,10	-4,1	0,76
B <sub>11</sub>	0,76	0,51	0,02	0,3	-0,4	-0,99	2,44	-1,69	-1,24	-0,08
B <sub>22</sub>	0,34	-23,0	0,24	-0,20	-0,03	0,11	-0,36	-0,5	0,31	0,05
B <sub>33</sub>	-1,4	20,5	-0,03	-0,25	-0,3	-0,84	2,09	-0,25	1,41	0,3
B <sub>12</sub>	0,3	-16,5	-0,11	0,10	0,43	0,37	1,08	2,59	2,20	0,01
B <sub>13</sub>	0,13	-1,5	0,26	0,40	-0,37	-1,11	1,00	-2,10	-0,88	0,1
B <sub>23</sub>	-0,25	1,5	-0,09	-0,10	-0,04	-0,15	-0,78	-1,53	0,15	0,04

Вплив факторів складу на середню густина є дещо іншим. Вони всі мають практично однакову величину впливу, однак, якщо РПБ та зола при збільшенні їх частки викликають підвищення густини, то РПП – призводить до її зменшення. Це пояснюється залученням повітря в розчин в присутності порошку Крім того, рівномірно розподілене повітря надає пластифікуючого ефекту розчинним сумішам, що в свою чергу призводить до збільшення рухомості.

Аналіз отриманих коефіцієнтів рівнянь міцнісних показників (табл. 3.8) показує, що у діапазоні варіювання досліджуваних факторів, розчинів, які містять РПБ, як і слід було очікувати, найбільш помітний вплив чинять витрати РПБ та полімерного порошку. Спостерігається суттєвий вплив ефектів взаємодії факторів. Зокрема: вміст РПБ та золи призводять до росту міцності при стиску в усі терміни твердіння, а РПБ та полімерного порошку до зростання міцності на згин у віці 28 діб. Визначальним фактором для збільшення адгезійної здатності є наявність РПП. Досягнення високих

міцнісних та інших якісних показників розчинових сумішей та розчинів можливе при відповідній оптимізації складів розчинів.

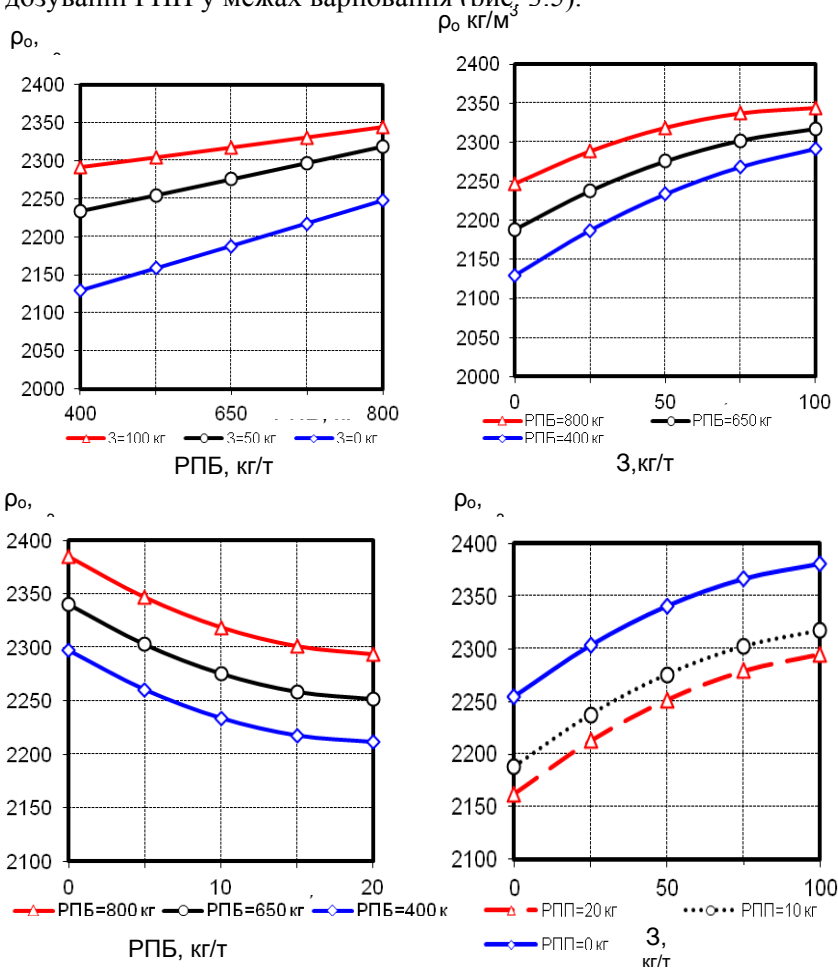
Для аналізу отриманих рівнянь регресії побудовані двофакторні графічні залежності, які ілюструють вплив факторів складу на властивості розчинових сумішей та розчинів (рис. 3.4...3.13).



**Рис. 3.4.** Графічні залежності рухомості ремонтних розчинових сумішей на основі РПБ від факторів складу

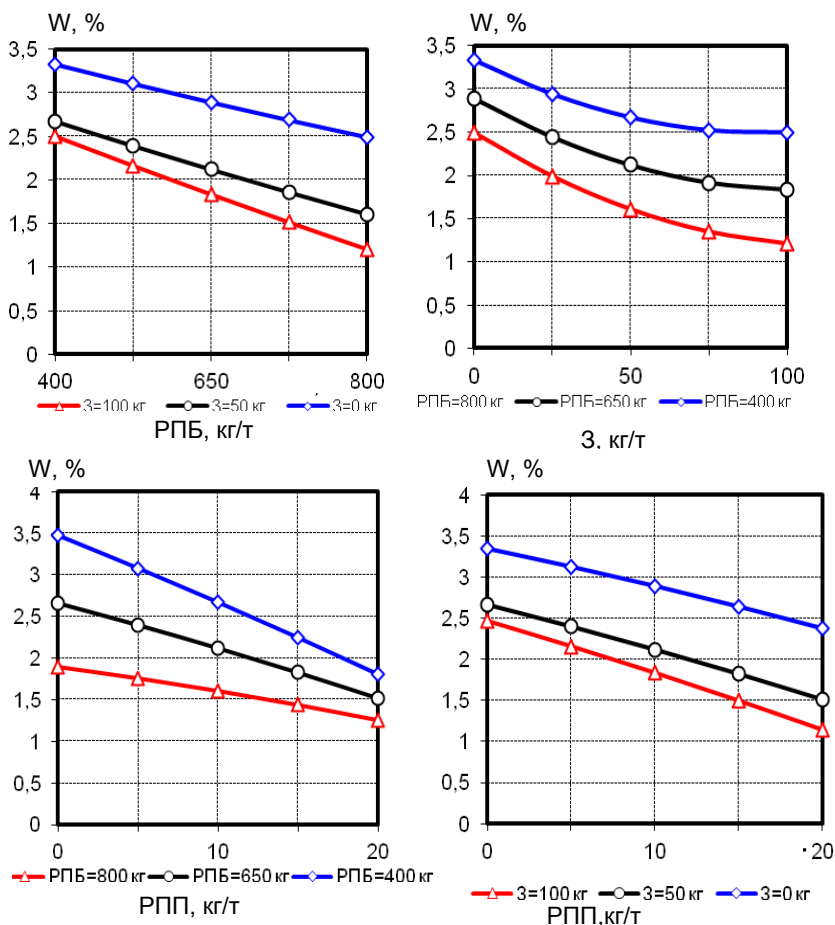
Введення РПП до складу розчину призводить до зниження середньої густини, що добре видно на рис. 3.5. Це супроводжується залученням повітря в розчин в присутності водорозчинного полімеру. Густина в порівнянні з еталоном

знизилися для різних дозувань на 7-11%. Крім того, рівномірно розподілене повітря надало пластифікуючого ефекту розчиновим сумішам, що виразилося в збільшенні глибини занурення конуса з 6...9 см до 11...13,5 см при максимальному дозуванні РПП у межах варіювання (рис. 3.5).



**Рис. 3.5.** Графічні залежності середньої густини ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

При цьому встановлено, що локалізація повітряних пор якісно не залежить від дозування РПП в межах 0-2%.

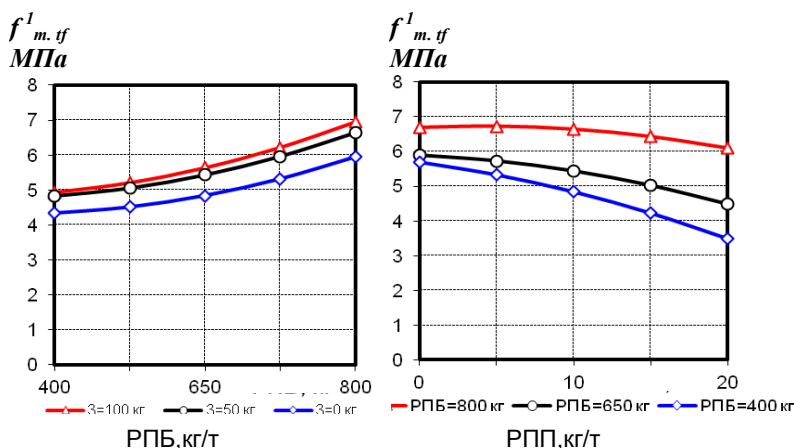


**Рис. 3.6.** Графічні залежності водопоглинання ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

Збільшення дозування РПП Neolith P 4400 до 2% маси суміші супроводжує зменшення водопоглинання на 50..60% при максимальному вмісті РПБ (800 кг) та майже в 2 рази при помірній витраті РПБ (400 кг).

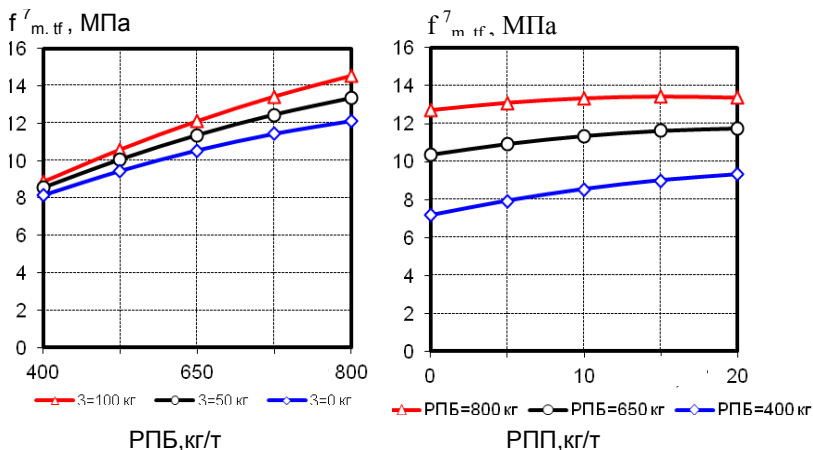
Низький водовміст розчинових сумішей на основі досліджуваних РПБ, підвищена відносна густина цементного каменю, інтенсивна гідратація та тверднення обумовлюють відповідні особливості порової структури розчинів. Аналіз даних, приведених в табл. 3.7 і на рис. 3.7 показує, що як варто було очікувати, збільшення вмісту РПБ та золи в розчинових сумішей призвело до суттєвого зменшення водопоглинання, як характеристики відкритої капілярної пористості за рахунок зменшення водовмісту.

Важливим наслідком введення РПП Neolith P 4400 в суміші є покращення структури порового простору за рахунок зменшення розміру пор та підвищення однорідності їхнього розподілення. Зменшення товщини водних прошарків на зернах в'язучого обумовлює зменшення середнього радіуса капілярів [1], а однорідності їхнього розподілення сприяє адсорбція на активних центрах твердої фази.

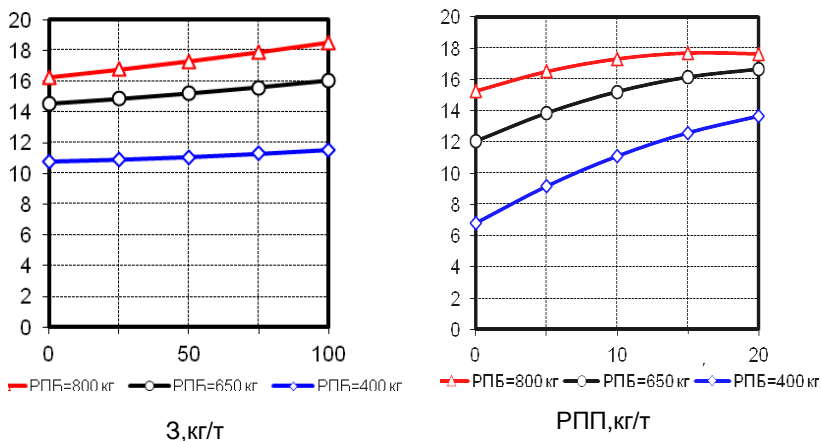


**Рис. 3.7.** Графічні залежності міцності при згині у віці 1 доби ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

В процесі плівкоутворення в твердіючому розчині утворюються полімерні плівки, що закривають мікропори і полімерні «містки», що з'єднують краї мікротріщин внутрішніх дефектів.



**Рис. 3.1.** Графічні залежності міцності при згині у віці 7 діб ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу



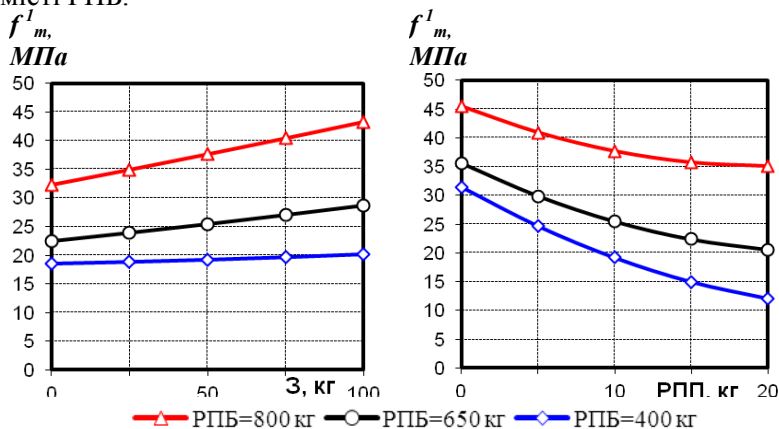
**Рис. 3.9.** Графічні залежності міцності при згині у віці 28 діб ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

Це вказує на те, що існує певний оптимум вмісту РПБ та РПП в розчині, при якому зберігається суцільність цементного гелю в структурі, полімер же заповнює найдрібніші пори і

капіляри, а також оболікає цементні зростки і частинки заповнювача.

Аналізуючи отримані графічні залежності, що зображені на рис. 3.7...3.9 можна зробити висновок, що у межах варіювання факторів на міцність розчинів при згині визначальним є вміст РПБ. Збільшення кількості РПБ з 400 до 800 кг дозволяє підвищувати ранню міцність на 40...50% та марочну на 30...40% при збільшеному вмісті РПБ та золи-виносу, а в сумішах з пониженим вмістом РПБ спостерігається ріст міцності на 8...12%. Зниження вмісту золи у вибраних межах також може знижувати, або практично не впливати на міцність.

Збільшення вмісту РПП в складі суміші може викликати як збільшення так і деяке зниження міцності розчинів. Вплив РПП на 1-добову міцність розчинів спричиняє негативний ефект, що нівелюється при максимальній витраті РПБ та помірній до 1% кількості полімерного порошку. У віці 7 та 28 діб Neolith P 4400 має екстремальний вплив при максимальному вмісті РПБ.

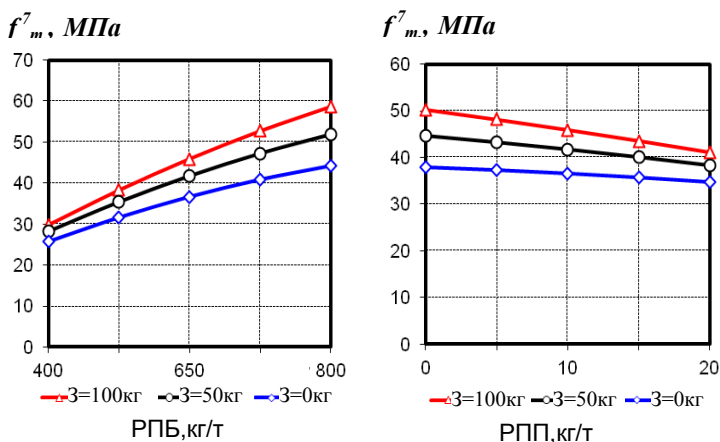


**Рис. 3.10.** Графічні залежності міцності при стиску у віці 1 доби ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

Збільшення міцності розчинів на згин при вмісті РПП 1% відзначається при одночасному збільшенні вмісту золи-виносу та зменшенні РПБ.

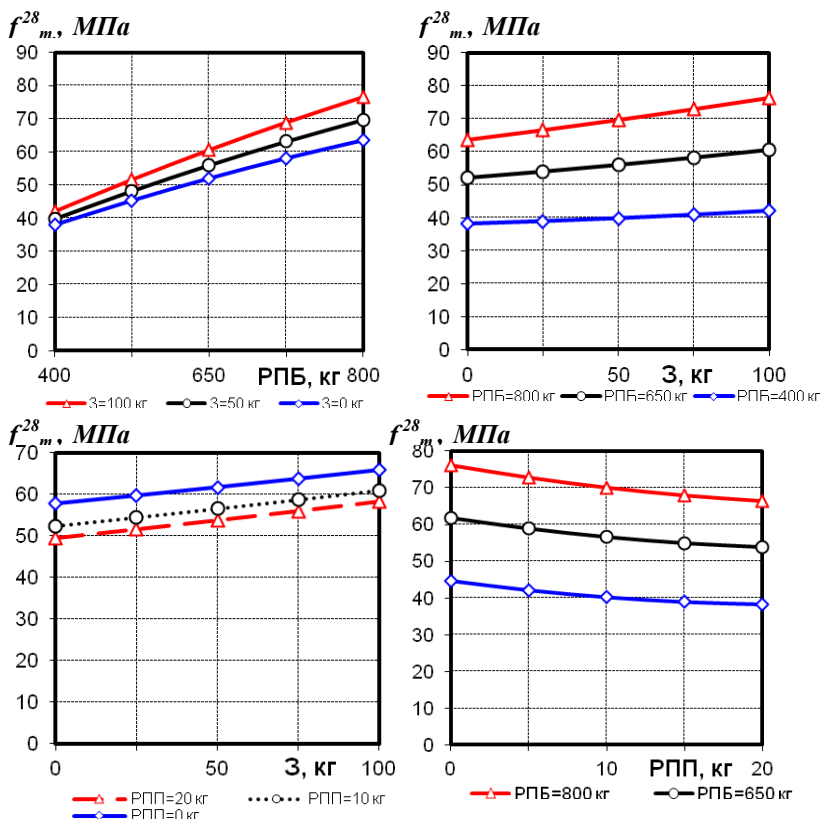


Аналіз отриманих графічних залежностей (рис. 3.11) свідчить про те, що у діапазоні варіювання досліджуваних факторів на міцність розчинів при стиску у віці 1 доби, визначальною є витрата РПБ. Збільшення вмісту РПБ з 400 до 800кг/т дозволяє підвищувати міцність на 50...70% при витраті золи 0...50 кг. Збільшення понад 50 кг/т супроводжує подальший ріст міцності у віці 1 доби у 2...2.2 рази. Вплив введення золи-виносу має менш значний ефект, збільшення її вмісту до 50 кг/т дозволяє підвищувати міцність розчинів на 10...15% при помірних витратах РПБ (400...500 кг/т) та 25...30% при максимальному вмісті в межах варіювання. Це пояснюється формуванням щільної структури за рахунок початкової міцності контактів, рівномірного розподілу часток зерен в'язучого і заповнювача та активації кристалізаційних процесів. Вплив добавки має менш значний ефект, при чому введення РПП Neolith P 4400 у кількості 10% призводить до зниження ранньої міцності на 25...30% при максимальній частці РПБ та на 70...100% за умови збільшення вмісту РПП до 20%. Це пояснюється надлишковою кількістю залученого повітря до складу суміші, а також сповільненням процесів гідратації цементного каменю у присутності полімерів.



**Рис. 3.2.** Графічні залежності міцності при стиску у віці 7 діб ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

Проаналізувавши отримані графічні залежності (рис. 3.11, 3.12) маємо, що у досліджуваному діапазоні зміни факторів складу сухих сумішей, можливе отримання розчинів з 28-добовою міцністю при стиску 36,6...82,6 МПа. В 7-добовому віці міцність розчинів сягає 65...82% марочної 28-добової міцності. Міцність закономірно знижується при зміні складів сумішей, що призводять до збільшення водоцементного відношення. В цьому плані особливо суттєво відчувається вплив витрати РПБ та золи.



**Рис. 3.3.** Графічні залежності міцності при стиску у віці 28 діб ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

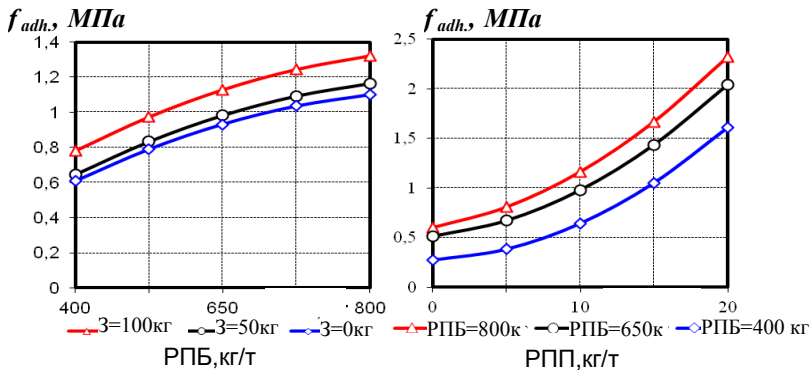
На графіках як 7-и так і 28-добової міцності найбільш значні лінійні ефекти проявляються для факторів  $X_1$  і  $X_4$ , тобто витрат РПБ і золи-виносу.

Збільшення вмісту дисперсних компонентів (РПБ, зола-виносу) суміші може викликати збільшення 28-добової міцності розчинів. Ріст міцності розчинів при збільшенні вмісту порошкового бетону більш вагомий при підвищеному вмісті золи. Деяке збільшення міцності розчинів при збільшенні вмісту золи-виносу відзначається при підвищеному вмісті РПБ. При недостатньому вмісті останнього в розчинових сумішах зростання міцності практично не спостерігається. Зниження міцності притаманне при максимальному дозуванні у розчиновій суміші РПП, що пояснюється значною кількістю залученого повітря в складі досліджуваної суміші. Добавка Neolith P 4400 при максимальній частці РПБ призводить до зниження марочної міцності на 12...17% у порівнянні зі складом без полімеру та на 8...12% при мінімальній витраті РПБ.

Позитивний вплив золи та РПБ на міцність розчинів може бути суттєво зменшений чи зведений до нуля при неоптимальній витраті полімерного порошку.

Досягнення певних значень міцнісних показників розчинів можливе при різних співвідношеннях факторів, які характеризують вміст основних компонентів. При цьому спільне введення дисперсних компонентів позитивно позначається на міцності розчину навіть при незмінному водовмісті, що можна пояснити створенням кращих умов для ущільнення та взаємодії між частинками у твердіючому розчині.

Аналіз отриманих даних табл. 3.7, 3.8 та рис. 3.13 свідчить, що застосування в ремонтних розчинах як основного компоненту РПБ дає можливість забезпечити в досліджуваному діапазоні достатньо високі значення адгезійної міцності (до 2,5 МПа), що значно перевищують нормативні. Визначальним фактором є вміст РПП, введення якого в кількості до 2% за інших рівних умов дозволяє підвищити адгезійну міцність розчину в 3...4 рази або на 0,9...1,6 МПа.



**Рис. 3. 4.** Графічні залежності адгезійної міцності ремонтних розчинів на основі РПБ від факторів складу

Підвищення кількості золи-виносу у складі ремонтних розчинів до 50 кг супроводжує збільшення міцності зчеплення з основою на 8...12%, а при подальшому збільшенні вмісту золи до 100 кг/т – 25...30% за умови зменшення частки РПБ та 15...20%. Такий вплив згаданих технологічних факторів на адгезію можна пояснити впливом не тільки пористості контактної шару, але й ступеня змочування розчином основи.

Суперпластифікатор Melflux у складі реакційно-порошкового бетону позитивно впливає на адгезію розчинів як в результаті зміни їх поверхневої енергії, так і в результаті зміни якісних характеристик контактної шару, насамперед в результаті збільшення його змочуваності і зменшення вмісту надлишкової вологості.

### 3.1.4. Гідроізоляційні суміші

Надійність експлуатації будівельних об'єктів багато в чому залежить від їх гідроізоляції.

Просочування води відбувається через пори. Пористість є невід'ємною складовою цементної матриці. Так, при В/Ц = 0,5 об'єм пор розмірами від 1 нм до 1 мм становить 46% об'єму

цементного каменю. Чим вище В/Ц, тим в більшій кількості утворюються пори [4; 7; 8].

Важливим є вибір цементів, які повинні містити мінімум компонентів, які при гідратації і його твердінні перетворюються в водорозчинні сполуки. Вирішальну роль для досягнення високих фізико-механічних характеристик відіграють інертні наповнювачі. Важливий не тільки мінералогічний і фракційний склад, а й конфігурація частинок наповнювачів, а також відсутність в них капілярних пор.

Заповнювачі і наповнювачі не повинні містити водорозчинних компонентів [9; 10]. Їх наявність підвищує гідрофільність розчину, веде до росту В/Ц. При виборі наповнювачів рекомендується перевіряти їх водопоглинання і розчинність в нейтральному і лужному середовищі. Інертні наповнювачі не повинні містити компонентів, що змінюються в об'ємі при контакті з водою. Винятком є коьматаційні гідроізоляційні суміші. Ситові характеристики інертних наповнювачів повинні забезпечувати максимально щільну упаковку.

Для вивчення впливу факторів складу гідроізоляційних сумішей на основі РПБ на їх властивості були виконані алгоритмізовані експерименти відповідно до тривіневого двохфакторного плану  $B_2$  [6]. Умови планування експериментів наведені в табл. 3.9.

Таблиця 3.9

Умови планування експериментів

Фактори впливу		Рівні варіювання			Інтер-вал
Натуральний вид	Кодований	-1	0	+1	
Частка РПБ, % по масі	$X_1$	25	37,5	50	12,5
Вміст Neolith P 4400, % мас	$X_2$	1	1,5	2	0,5

Як параметри фіксували водопоглинання, водонепроникність, міцність при стиску та згині розчинів. Границю міцності на розтяг при згині та стиск розчину у віці 1, 7 та 28 діб, які тверднули у повітряно-сухих умовах, а також водопоглинання визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-239. Водонепроникність визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-126:2011.

Матриця планування та склад гідроізоляційних сумішей, а також експериментальні результати наведено в табл. 3.10...3.12 відповідно.

Таблиця 3.10

Матриця планування та склад гідроізоляційних сумішей

№ з/п	Кодовані значення		Натуральні значення		Витрати матеріалів на 1т суміші			Вода замішування, л
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	РПБ, %	РПП, %	РПБ, кг	РПП, кг	Пісок, кг	
1	1	1	50	2	500	20	480	140
2	1	-1	50	1	500	10	490	155
3	-1	1	25	2	250	20	730	150
4	-1	-1	25	1	250	10	740	175
5	1	0	50	1,5	500	15	485	150
6	-1	0	25	1,5	250	15	735	155
7	0	1	37,5	2	375	20	605	125
8	0	-1	37,5	1	375	10	615	140
9	0	0	37,5	1,5	375	15	610	135
10	0	0	37,5	1,5	375	15	610	135
11	0	0	37,5	1,5	375	15	610	135

Після статистичної обробки результатів експериментів (табл. 3.11), виконаних згідно плану були отримані коефіцієнти рівнянь регресії (табл. 3.12), які можна розглядати як характеристики впливу на якісні показники властивостей розчинів досліджуваних факторів в певному діапазоні їх варіювання.

Таблиця 3.11

Експериментальні результати дослідження гідроізоляційних сумішей

Точка плану	Водопоглинання у віці 28 діб,%	Міцність, МПа						Водонепроникність, у віці 28 діб, МПа
		на згин, у віці			на стиск, у віці			
		1 доба	7 діб	28 діб	1 доба	7 діб	28 діб	
1	1,4	2,1	4,3	6,50	4,0	8,0	18,0	1,0
2	2,7	3,1	3,4	5,94	7,0	15,0	24,0	0,8
3	3,2	1,2	2,7	3,67	2,0	4,2	7,5	0,6
4	4,1	1,9	2,1	2,24	3,0	7,5	10,0	0,4
5	2,0	2,4	3,6	5,98	6,0	12,0	22,0	0,8

продовження табл. 3.11

Точка плану	Водопог- линання у віці 28 діб,%	Міцність, МПа						Водонепро- никність, у віці 28 діб, МПа
		на згин, у віці			на стиск, у віці			
		1 доба	7 діб	28 діб	1 доба	7 діб	28 діб	
6	3,5	1,5	1,9	3,02	2,6	4,5	9,0	0,4
7	2,6	1,8	3,9	4,89	3,3	6,0	14,0	0,8
8	3,9	2,6	2,9	4,21	5,3	10,0	17,0	0,4
9	3,2	2,1	3,2	4,62	4,3	8,5	15	0,6
10	3,3	2,1	3,3	4,60	4,0	8,0	16	0,6
11	3,3	2,0	3,2	4,50	4,0	8,0	16	0,6

Статистична обробка експериментальних даних дозволила отримати коефіцієнти рівнянь регресії водопоглинання, а також міцності при стиску та згині досліджуваних розчинових сумішей та розчинів, наведені в табл. 3.12.

Аналіз коефіцієнтів рівнянь регресії (табл. 3.12) показників властивостей гідроізоляційних розчинів дозволяє оцінити фактори за величиною ефекту їхнього впливу. На досліджувані властивості більш суттєвий вплив чинить вміст РПБ у порівнянні з добавкою полімерного порошку Neolith 4400 при збільшенні їх витраті в діапазоні варіювання. Згідно отриманих даних спостерігається суттєвий вплив ефектів взаємодії факторів. Очевидно, що досягнення високих фізико-механічних показників розчинів можливе при відповідній оптимізації вмісту РПБ та РПП у їх складі.

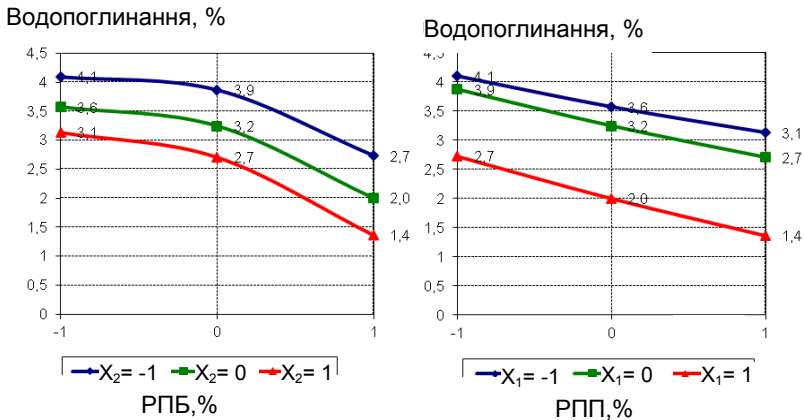
Таблиця 3.12

Коефіцієнти рівнянь регресії

Коефіцієнти	Водопоглинання у віці 28 діб $W_{0,28}$ , %	Міцність на згин, МПа, у віці			Міцність на стиск, МПа, у віці		
		1 доби	7 діб	28 діб	1 доби	7 діб	28 діб
$b_0$	3,24	2,06	3,19	4,55	4,19	8,05	15,77
$b_1$	-0,78	0,50	0,77	1,58	1,57	3,13	6,25
$b_2$	-0,58	-0,42	0,42	0,44	-1,0	-2,38	-1,92
$b_{11}$	-0,46	0,2	-0,38	-0,02	-0,06	0,39	-0,42
$b_{22}$	0,04	0,14	0,27	0,03	-0,06	0,14	-0,42
$b_{12}$	-0,1	-0,08	0,08	-0,22	-0,50	-0,93	-0,88

Таким чином, аналіз отриманих рівнянь регресії показує, що отримання гідроізоляційних сумішей на основі РПБ, що включає ПЦ, золу-виносу, суперпластифікатор та дрібний пісок, є ефективним технологічним прийомом, який дозволяє підвищити якісні характеристики гідроізоляційних розчинів.

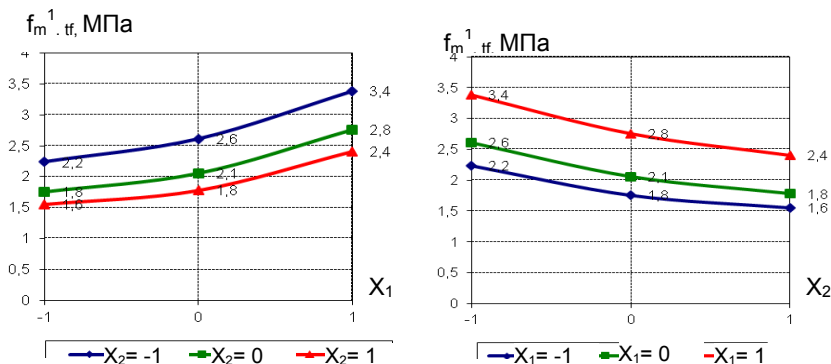
Для аналізу отриманих експериментально-статистичних моделей побудовані двофакторні графічні залежності, які відображають вплив факторів складу на властивості розчинів (рис. 3.14...3.19).



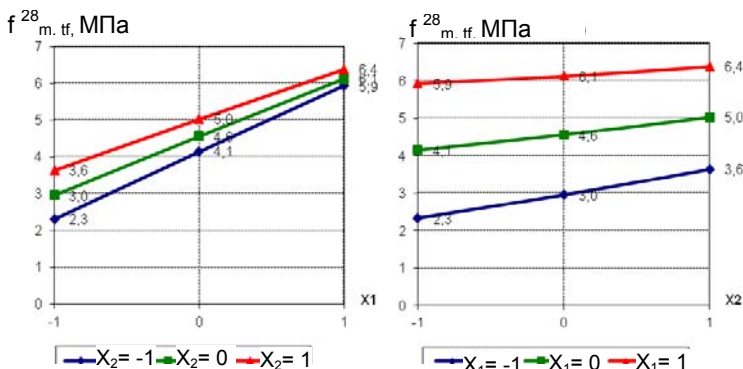
**Рис. 3.14.** Графічні залежності водопоглинання гідроізоляційних розчинів на основі РПБ від факторів складу де  $X_1$  – частка РПБ – 25%, 37,5%, 50%,  $X_2$  – вміст РПП Neolith P 4400 – %, 1,5%, 2%

Про ступінь впливу факторів складу розчинів свідчать результати визначення параметрів водопоглинання (рис. 3.14, табл. 3.11). Водопоглинання розчину більш помітно зменшується по мірі збільшення вмісту РПБ у суміші у порівнянні з РПП. Вміст порошкової бетонної суміші в межах 650...800 кг/т є достатнім для забезпечення достатнього низького водопоглинання при мінімальній та максимальній витраті полімерного порошку, яке становить 1,4...3,9% відповідно.





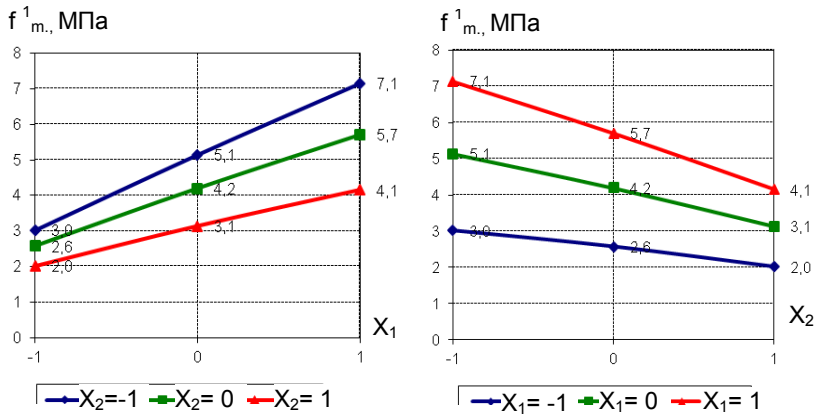
**Рис. 3.15.** Графічні залежності міцності при згині у віці 1 доби гідроізоляційних розчинів на основі РПБ від факторів складу де  $X_1$  – частка РПБ – 25%, 37,5%, 50%,  $X_2$  – вміст РПП Neolith P 4400 – %, 1,5%, 2%



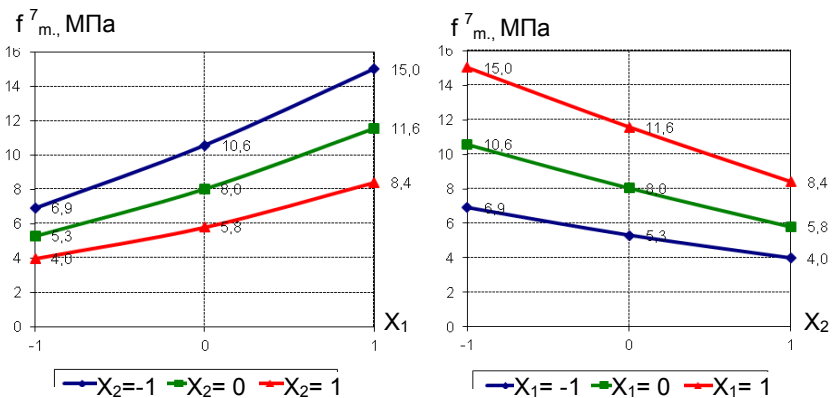
**Рис. 3.16.** Графічні залежності міцності при згині у віці 28 діб гідроізоляційних розчинів на основі РПБ, де  $X_1$  – частка РПБ – 25%, 37,5%, 50%,  $X_2$  – вміст РПП Neolith P 4400 – %, 1,5%, 2%

З отриманих даних чітко видно негативний вплив на міцність розчинів, як при стиску так і при згині у віці 1 доби, збільшення вмісту добавки РПП (рис. 3.15...3.19). Разом з тим, варто відмітити, що при підвищенні вмісту полімеру спостерігається позитивний вплив на міцність при згині у віці 28 діб.

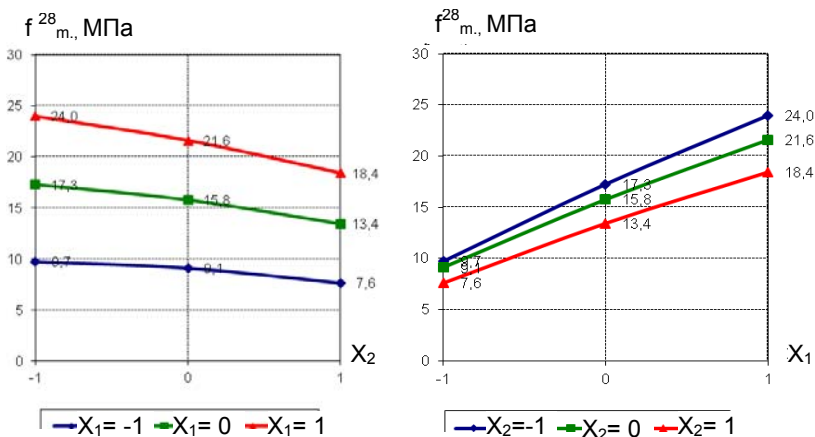
Ефект взаємодії факторів є негативним, хоча вклад його на величину міцності не дуже значний.



**Рис. 3.17.** Графічні залежності міцності при стиску у віці 1 діб гідроізоляційних розчинів на основі РПБ, де  $X_1$  – частка РПБ – 25%, 37,5%, 50%,  $X_2$  – вміст РПП Neolith P 4400 – %, 1,5%, 2%



**Рис. 3.18.** Графічні залежності міцності при стиску у віці 7 доби гідроізоляційних розчинів на основі РПБ, де  $X_1$  – частка РПБ – 25%, 37,5%, 50%,  $X_2$  – вміст РПП Neolith P 4400 – %, 1,5%, 2%



**Рис. 3.19.** Графічні залежності міцності при стиску у віці 28 діб гідроізоляційних розчинів на основі РПБ, де  $X_1$  – частка РПБ – 25%, 37,5%, 50%,  $X_2$  – вміст РПП Neolith P 4400 – %, 1,5%, 2%

Вплив досліджуваних факторів на показник міцності є у певній мірі лінійним, про що свідчать незначимі квадратичні коефіцієнти рівнянь регресії. Особливо характерно це проявляється для міцності на згин у віці 28, діб на стиск в усі терміни твердіння. Збільшення кількості РПБ від 400 до 800 кг/т призводить до збільшення 1-о добової міцності на стиск в 1.8...2 рази, а 28-и добової в 2,4 рази. Для міцності при згині, приріст міцності, що зумовлений збільшенням витрати РПБ, більш низький 50...60% та 70...80% – відповідно при вмісті РПП 1% та 2%.

Як випливає з характеру взаємодії підвищений вміст полімерної добавки більш позитивно впливає на міцність розчину на згин при меншій витраті РПБ.

**Водонепроникність.** Водонепроникність розчинів у вирішальній мірі залежить від особливостей його пористої структури. Якщо на міцність бетону основний вплив має загальна пористість, то водонепроникність є функцією відкритої наскрізний пористості. Рядом дослідників [8; 11] зазначено, що основними шляхами проникнення води в розчин є пори седиментаційного походження, утворення яких найбільш

характерно для бетонів і розчинів з підвищеною рухомістю. Седиментація залежить головним чином від в'язкості цементного тіста, а основною седиментаційною характеристикою розчинової суміші є її водовідділення.

Зола-виносу робить істотний вплив на в'язкість пластифікованого цементного тіста і водовідділення бетонної суміші. За рахунок золи-виносу, що вводиться до складу РПБ зменшується кількість мікропор і має місце кольматація відкритих пор.

Основним чинником, що визначає величину водонепроникності – водоцементне відношення. Різке зменшення водонепроникності при В/Ц менше 0,25...0,4 може бути пояснено як зменшенням загальної пористості, так і перерозподілом співвідношення між різними типами пор.

Водонепроникність гідроізоляційних розчинових сумішей на основі РПБ у віці 28 діб за рахунок вибору оптимальних значень факторів та їх поєднань може досягати значення  $W=0,6...1,0$  МПа.

Із збільшенням тривалості твердіння водонепроникність підвищується в результаті незворотної зміни структури порового простору і збільшення об'єму твердої фази в цементному камені.

За даними В.В. Стольнікова [11; 12] при достатньому вологісному режиму твердіння підвищення водонепроникності розчинів в пізні терміни значно більше, ніж відносний приріст міцності на стиск. При цьому найбільше збільшення водонепроникності відзначено за інших рівних умов для бетонів і розчинів з вищими значеннями В/Ц і меншу з низькими значеннями В/Ц. З метою визначення впливу РПБ на проникність був визначений характер пористості зразків на основі золівмісних РПБ з різним вмістом РПП в їх складі. Було доведено, що введення РПП у кількості 1% незначно зменшує кількість відкритих капілярних пор. Із збільшенням вмісту Neolith P 4400 до 2% загальна кількість капілярних пор суттєво зменшується. Однак підвищений вміст РПБ (800 кг/т) призводить до значного зменшення еквівалентного радіуса пор, що зумовлює зниження проникності затверділого розчину.

Особливості порової структури розчинів та низьке водопоглинання є визначальними для їх водонепроникності. В процесі твердіння розчинів утворюються полімерні плівки, що закривають мікропори і полімерні «містки», що з'єднують краї мікротріщин внутрішніх дефектів.

Гідроізоляційні суміші на основі РПБ характеризуються високими марками за водонепроникністю W6-W10, що дозволяє їх використовувати в різних конструкціях.

### **3.1.5. Поризовані та теплоізоляційні суміші**

У сучасних економічних умовах в Україні у зв'язку з високою ціною на енергоносії все більшої актуальності набуває проблема енергозбереження. Вирішення цієї проблеми досягається застосуванням ефективних поризованих та теплоізоляційних матеріалів.

*Легкі поризовані розчини.* Для зменшення теплопровідності розчинів до їх складу вводять легкі заповнювачі (спучений перлітовий, вермикулітовий та інші піски), або застосовують добавки-поризатори. Однак міцність таких розчинів часто буває недостатньою (марки не вище М50...М75), до того ж для її забезпечення необхідна підвищена (до 500 кг/м<sup>3</sup>) витрата портландцементу.

Для досягнення достатньої міцності при необхідній рухомості розчинової суміші, як показали наші дослідження, можна використовувати в якості основного компоненту реакційно-порошкові бетонні. Такі суміші доцільно виготовляти у вигляді готових до використання сухих будівельних сумішей (СБС), або змішуванням РПБ з необхідною кількістю легкого заповнювача та піску, як в заводських умовах, так і безпосередньо на будівельному майданчику.

Для підвищення термічного опору конструкцій при зведенні будівель та споруд доцільно використовувати поризовані розчини. Поризовані розчини на основі сухих сумішей при відповідності їх властивостей необхідним вимогам можуть успішно використовуватись для влаштування «теплых підлог», у якості штукатурних, а також як мурувальні розчини

при застосуванні стінових матеріалів з підвищеними теплоізоляційними властивостями (поризовані керамічні блоки, піно-, газобетонні блоки і т.п.). Ефект від застосування таких матеріалів зростає, якщо теплопровідність розчину для кладки не поступається аналогічному показнику стінового матеріалу. Як відомо, традиційні цементно-піщані мурувальні розчини мають високу теплопровідність (0,8-0,9 Вт/м·К), що особливо негативно відображається в кладці з поризованих блоків (0,16 Вт/м·К), які вони скріплюють, в результаті чого в такій конструкції в місцях шва утворюються «містки холоду». При застосуванні таких розчинів збільшення товщини швів до 10 мм призводить до зниження середнього термічного опору конструкції приблизно на 20%.

Зазвичай традиційна технологія передбачає нанесення мурувальних розчинів шаром 10...20 мм. Сучасні технології дозволяють виготовляти стінові камені та блоки з мінімальними (до 1 мм) відхиленнями геометричних розмірів від стандартних, що дає можливість використовувати тонкошарову кладку з товщиною шва 1...5 мм і призводить до суттєвої економії розчину. Розчини для тонкошарової кладки повинні мати теплопровідність, яка наближається до теплопровідності пористих стінових матеріалів. Поряд зі зменшенням теплових витрат такі розчини повинні забезпечувати високу адгезію до основи, водо- та морозостійкість.

З метою вивчення впливу факторів складу на міцнісні характеристики полегшених розчинів на основі РПБ, а також встановлення оптимальних параметрів їх виготовлення основні дослідження були виконані із застосуванням математичного планування експериментів. Для цього був реалізований тривірневий трьохфакторний план  $B_3$  [6], умови планування експериментів якого наведені в табл. 8.13.

Як добавка-поризатор розчинів був застосований піноутворювач UFAPORE CC85 виробництва фірми Bang & Bonsor концерну Mapei. Даний поризатор є сумішшю аніоноактивних ПАВ. Рекомендоване дозування добавки при введенні в мурувальні розчини – 0,02...0,05% маси в'язучого. Окрім пластифікації та підвищення морозостійкості розчину

добавка поризатору дещо знижує водовідділення і седиментаційне розшарування розчинних сумішей [3].

Для підвищення ефективності введення суперпластифікаторів, а також при виконанні робіт у холодну пору року, при температурах нижче 5° С доцільне введення прискорювача тверднення  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Таблиця 3.13

Умови планування експериментів при дослідженні поризованих розчинів

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Відношення цементу до заповнювача, (РПБ/Зап.)	$X_1$	1:3	1:2	1:1	1
Вміст добавки Ufaroge у розчині, %	$X_2$	0,04	0,075	0,11	0,035
Вміст $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , у розчині, % від РПБ	$X_3$	0	1	2	1

У ході досліджень виготовляли розчини на основі РПБ, у яких в якості заповнювача використовували золу-виносу та кварцовий пісок. Рухомість розчинів становила 180 мм за розпливом на віскозиметрі Суттарда. Для розчинової суміші визначали водов'язуче відношення, яке забезпечує необхідну рухомість, для отриманих розчинів – середню густину та міцність на стиск зразків-кубів з ребром 70,7 мм, які тверднули у повітряно-сухих умовах у віці 3 та 28 діб згідно з ДСТУ Б В.2.7-126:2011. Основні експериментальні результати досліджень мурувальних поризованих розчинів на основі РПБ наведені в табл. 3.14 та на рис. 3.20...3.23.

Після проведення обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі у вигляді поліноміальних рівнянь регресії, які наведені в табл. 3.15, і відповідні графічні залежності середньої густини та міцності у віці 3 та 28 діб на рис. 3.21...3.23.

Таблиця 3.14

## Експериментальні результати досліджень поризованих розчинів

№	Фактори			В/Ц		$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>		Міцність у віці, МПа, діб				Теплопровідність $\lambda$ , Вт/(м·К)		Коефіцієнт конструктивної якості ККЯ*	
	РПБ Зап	Ufapore, %	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , %	Заповнювачі											
				Зола	Пісок	Зола	Пісок	Зола		Пісок		Зола	Пісок	Зола	Пісок
								3	28	3	28				
1	1:1	0,11	2	0,4	0,34	1180	1320	8,9	15,4	10,2	17,7	0,32	0,36	0,013	0,013
2	1:1	0,11	0	0,38	0,32	1170	1310	8,1	14,0	9,2	16,0	0,32	0,36	0,012	0,012
3	1:1	0,04	2	0,51	0,43	1340	1490	12,7	21,9	14,7	25,4	0,36	0,41	0,016	0,017
4	1:1	0,04	0	0,5	0,43	1320	1470	11,7	20,1	13,6	23,3	0,36	0,40	0,015	0,016
5	1:3	0,11	2	0,55	0,47	1360	1550	6,1	10,5	7,0	12,1	0,37	0,42	0,008	0,008
6	1:3	0,11	0	0,53	0,45	1350	1540	5,7	9,8	6,5	11,2	0,37	0,42	0,007	0,007
7	1:3	0,04	2	0,66	0,56	1400	1590	7,8	13,4	9,0	15,5	0,38	0,43	0,010	0,010
8	1:3	0,04	0	0,64	0,54	1390	1580	7,0	12,0	7,9	13,6	0,38	0,43	0,009	0,009
9	1:1	0,075	1	0,45	0,38	1210	1370	10,0	17,2	11,4	19,6	0,33	0,37	0,014	0,014
10	1:3	0,04	1	0,65	0,55	1390	1580	7,4	12,7	8,6	14,7	0,38	0,43	0,009	0,009
11	1:2	0,11	1	0,45	0,38	1200	1380	8,4	14,5	9,5	16,4	0,33	0,38	0,012	0,012
12	1:2	0,04	1	0,53	0,45	1290	1470	11,7	20,2	13,6	23,4	0,35	0,40	0,016	0,016
13	1:2	0,075	2	0,5	0,43	1250	1440	10,9	18,8	12,3	21,2	0,34	0,39	0,015	0,015
14	1:2	0,075	0	0,48	0,41	1240	1430	9,9	17,1	11,4	19,7	0,34	0,39	0,014	0,014
15	1:2	0,075	1	0,49	0,42	1250	1450	10,3	17,8	11,7	20,3	0,34	0,39	0,014	0,014
16	1:2	0,075	1	0,5	0,43	1250	1440	10,3	17,7	11,6	20,0	0,34	0,39	0,014	0,014
17	1:2	0,075	1	0,49	0,42	1240	1440	10,2	17,5	11,7	20,1	0,34	0,39	0,014	0,014

\* – відношення міцності розчину при стиску у віці 28 діб до його середньої густини

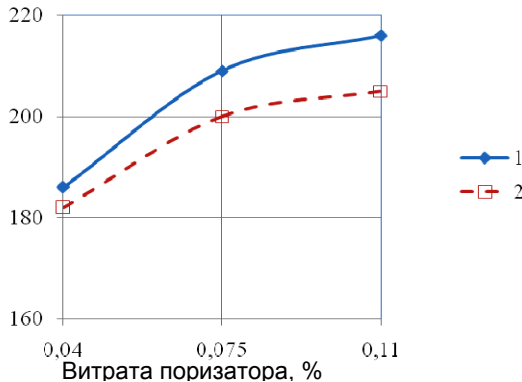


Таблиця 3.15

Експериментально-статистичні моделі властивостей  
поризованих розчинів на основі РПБ

Заповнювач	Експериментально-статистичні моделі
Середня густина, кг/м <sup>3</sup>	
зола	$\rho_{0(z)} = 1246 - 67 \cdot x_1 - 48 \cdot x_2 + 6 \cdot x_3 - 28,8 \cdot x_1 x_2 + 1,3 \cdot x_1 x_3 - 1,3 \cdot x_2 x_3 + 59 \cdot x_1^2 + 4 \cdot x_2^2 + 4 \cdot x_3^2$
пісок	$\rho_{0(n)} = 1440 - 88 \cdot x_1 - 50 \cdot x_2 + 6 \cdot x_3 - 31,3 \cdot x_1 x_2 + 1,3 \cdot x_1 x_3 - 1,3 \cdot x_2 x_3 + 43,5 \cdot x_1^2 - 6,5 \cdot x_2^2 + 3,5 \cdot x_3^2$
Міцність на стиск у віці 3 діб, МПа	
зола	$f_m^3 = 10,3 + 1,75 \cdot x_1 - 1,36 \cdot x_2 + 0,41 \cdot x_3 - 0,54 \cdot x_1 x_2 + 0,08 \cdot x_1 x_3 - 0,08 \cdot x_2 x_3 - 1,64 \cdot x_1^2 - 0,25 \cdot x_2^2 + 0,09 \cdot x_3^2$
пісок	$f_m^3 = 11,76 + 2,01 \cdot x_1 - 1,64 \cdot x_2 + 0,46 \cdot x_3 - 0,69 \cdot x_1 x_2 + 0,06 \cdot x_1 x_3 - 0,09 \cdot x_2 x_3 - 1,79 \cdot x_1^2 - 0,24 \cdot x_2^2 + 0,06 \cdot x_3^2$
Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа	
зола	$f_m^{28} = 17,77 + 3,02 \cdot x_1 - 2,34 \cdot x_2 + 0,7 \cdot x_3 - 0,94 \cdot x_1 x_2 + 0,14 \cdot x_1 x_3 - 0,14 \cdot x_2 x_3 - 2,83 \cdot x_1^2 - 0,43 \cdot x_2^2 + 0,16 \cdot x_3^2$
пісок	$f_m^{28} = 20,26 + 3,49 \cdot x_1 - 2,78 \cdot x_2 + 0,81 \cdot x_3 - 1,15 \cdot x_1 x_2 + 0,13 \cdot x_1 x_3 - 0,18 \cdot x_2 x_3 - 3,15 \cdot x_1^2 - 0,4 \cdot x_2^2 + 0,15 \cdot x_3^2$

РК, см

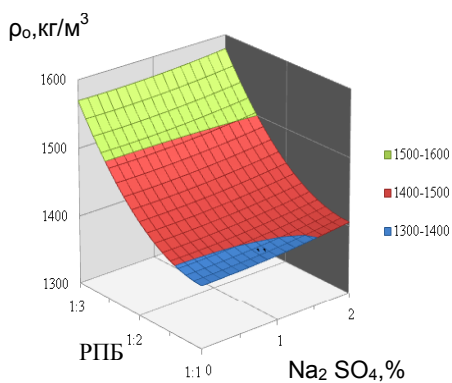
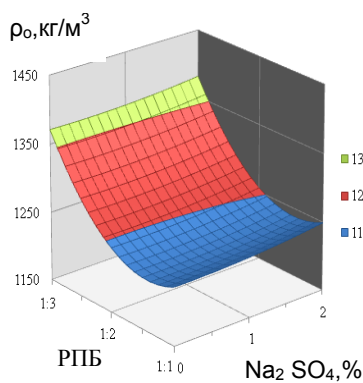
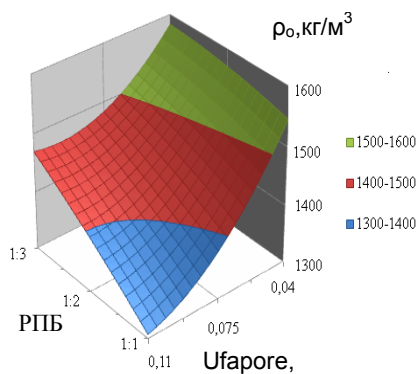
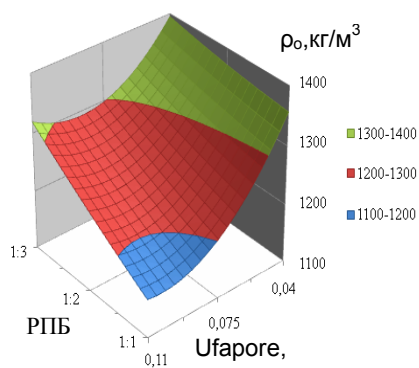


**Рис. 3.20.** Залежність розпливу конуса (РК) поризованих розчинів від витрати поризатора та виду заповнювача, (1 – заповнювач – зола-виносу; 2 – заповнювач – кварцовий пісок)

Аналізуючи отримані дані, можна відмітити, що поризація розчинів помітно збільшує їх рухомість згідно табл. 3.14 та рис. 3.20. Водопотреба розчинових сумішей для досягнення необхідної легкоукладальності суттєво зменшується при збільшенні кількості добавки-пороутворювача, але до певної межі, яка залежить від середньої густини отриманої розчинової суміші та співвідношення "в'яжуче:заповнювач". При однаковому вмісті пороутворювача зменшення співвідношення "РПБ:Заповнювач" від 1:1 до 1:2 незначно зменшує водопотребу розчинової суміші, у якій заповнювачем є зола-виносу. При цьому водов'яжуче відношення дещо збільшується. Подальше зменшення співвідношення " РПБ:Заповнювач" до 1:3 помітно зменшує водопотребу та водоцементне відношення. Заміна золи як заповнювача на кварцовий пісок суттєво зменшує водопотребу та збільшує рухомість розчинової суміші. Зниження водопотреби при цьому пропорційне збільшенню кількості добавки-пороутворювача та вмісту заповнювача в суміші за інших рівних умов.

Згідно отриманих математичних моделей (табл. 3.15) та графічних залежностей (рис. 3.21) можна зробити висновок, що основними факторами, що впливають на середню густину, є вміст та доля заповнювача, а також вміст добавки поризатора у розчині. Прискорювач твердіння введений до складу суміші, практично не впливає на густину.

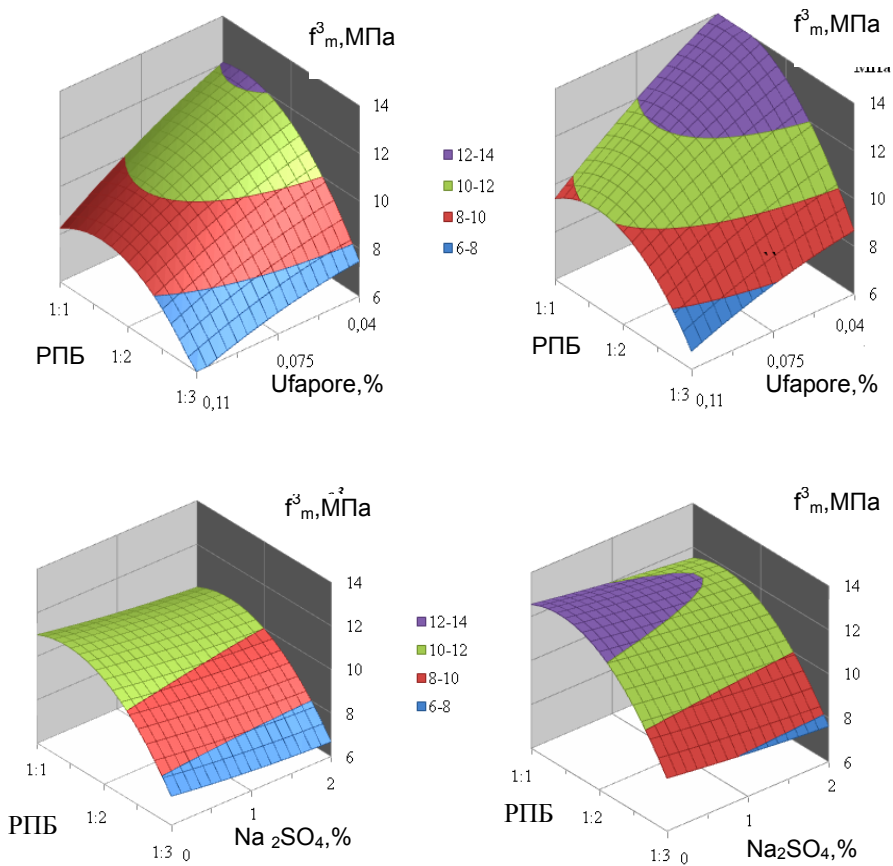
Збільшення вмісту пороутворювача зменшує густину розчину, втім після певної межі (приблизно 0,1% від маси сухої суміші) ефект стає нестабільним. Подальше зменшення густини при використанні прийнятого поризатора практично незначне. З цією метою можна використовувати добавки з більш інтенсивним піноутворенням, хоча при цьому можна очікувати негативного їх впливу на кінетику твердіння та міцність розчинів.



а)

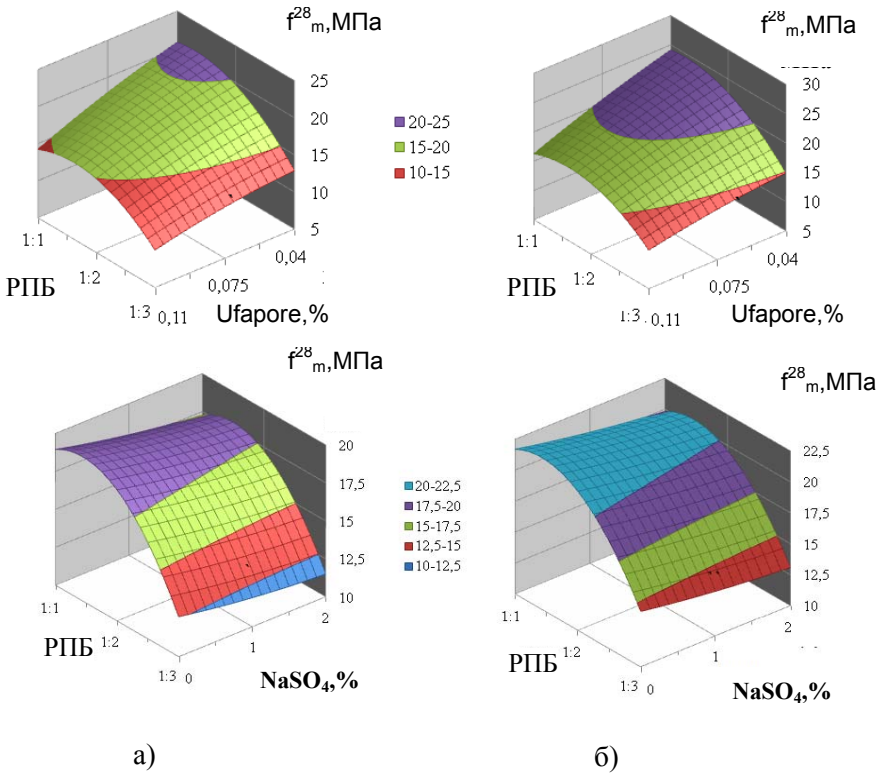
б)

**Рис. 3.21.** Поверхні відгуку середньої густини поризованих розчинів на основі РПБ, заповнювач: а – зола-виносу; б – кварцовий пісок



**Рис. 3.22.** Поверхні відгуку міцності поризованих розчинів у віці 3 діб на основі РПБ, (а) –зола-виносу; б) – кварцовий пісок)

Аналізуючи міцність поризованих розчинів (рис. 3.22, 3.23), можна зауважити, що як і слід було очікувати, вона залежить у першу чергу не від водов'язучого відношення, а від пористості розчину, яку можна оцінити за середньою густиною. Із збільшенням середньої густини міцність розчину зростає незалежно від складу розчину та виду заповнювача.



**Рис. 3.23.** Поверхні відгуків міцності поризованих розчинів у віці 28 діб на основі РПБ, заповнювач: а) – зола-виносу; б) – пісок

Для суміші на основі РПБ та золи-виносу характерна середня густина розчинів  $1200...1400 \text{ кг/м}^3$  та міцність  $13...20 \text{ МПа}$ . При цьому збільшення густини з  $1200$  до  $1300 \text{ кг/м}^3$  супроводжується ростом міцності на  $20...25\%$ , при співвідношенні суміші "РПБ:Зап" $=1:1$ , подальше збільшення середньої густини не призводить до суттєвого підвищення міцності.. Така ж залежність спостерігається за умови використання в якості заповнювача суміші кварцового піску, в цьому випадку отримують розчини міцністю  $15...24 \text{ МПа}$ . В свою чергу для цементно-піщаних сумішей середня густина збільшується до  $1310...1600 \text{ кг/м}^3$ . Поризовані розчини складу РПБ:Зап $=1:2$  при збільшенні густини від  $1210$  до  $1450 \text{ кг/м}^3$  характеризуються лінійним збільшенням міцності на  $60...70\%$ , максимальним значенням –  $20 \text{ МПа}$  та  $24 \text{ МПа}$  для заповнювачів золи-виносу та піску – відповідно. При збільшенні вмісту заповнювача (РПБ:Зап $=1:3$ ) маємо лінійне зменшення міцності при однаковій густині на обох видах заповнювачів. Прискорювач твердіння, який вводиться до складу суміші, призводить до росту ранньої міцності на  $10...15\%$  та марочної до  $10\%$ .

На основі отриманих експериментальних даних (табл. 3.14) були запропоновані склади сухих будівельних сумішей для поризованих розчинів марок М100...М200 з використанням РПБ (табл. 3.16).

Таблиця 3.16

Рекомендовані склади поризованих розчинів на РПБ

№ з/п	Марка розчину	$\rho_0, \text{кг/м}^3$	Вид заповнювача	Витрата, кг, на 1 т СБС			Витрата води при замішуванні, л
				РПБ	Заповнювач	UFAPORE	
1	М200	1500	пісок	285	715	0,4...0,5	100...120
2		1300	зола	350	650	0,4...0,5	140...150
3	М150	1350	пісок	310	690	0,9	110...130
4		1250	зола	300	700	1,1	160...170
5	М100	1200	зола	260	740	0,9...1,0	130...150

Виконані дослідження показали, що пропоновані РПБ доцільно використовувати в якості основи для сухих будівельних сумішей і поризованих розчинів на їх основі. У

випадку використання в якості заповнювача золи-виносу міцність розчинів досягається 15...20 МПа при середній густині 1200...1400 кг/м<sup>3</sup> та 20...25 МПа при середній густині – 1350...1550 кг/м<sup>3</sup> і використанні кварцового піску. Для досягнення вказаної середньої густини вміст у сухій суміші пороутворювача UFAPORE CC 85 повинен становити 0,04...0,11%. Введення прискорювача твердіння дозволяє отримати поризовані розчини з міцністю, яка вища на 10% від міцності розчинів без Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

### 3.1.6. Суміші для наливних підлог

Для сучасного стану розвитку будівельної індустрії та будівництва на Україні характерне зростання інтересу та попиту на СБС для влаштування наливних підлог [13...15]. Особливістю таких підлог є швидкий набір міцності, що дозволяє експлуатувати їх відразу після вкладання на відміну від цементних композицій для підлог. Класифікація сумішей для влаштування підлог регламентується ДСТУ Б В.2.7-126:2011 „Суміші будівельні сухі модифіковані”, згідно цих діючих норм, до підлог ставляться високі вимоги щодо їх міцності – 15...35 МПа, при цьому розтічність розчину для підлог повинна бути не менше 17 см.

Для досліджень використано наступні матеріали: РПБ (ПЦ-I – 35%, зола-виносу – 15%, пісок фр. 0,16...1,25мм – 50%, суперпластифікатор MELFLUX 2651F), відсіяний кварцовий пісок з розмірами зерен 0,2...0,8 мм, водоутримуюча добавка – «Tylose», технічний хлорид кальцію CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O. Експерименти виконано згідно вимог ДСТУ Б В.2.7-126:20011.

Для вибору технологічних параметрів виготовлення СБС для підлог, виконано алгоритмізовані експерименти у відповідності з типовим планом На<sub>5</sub> [6]. Умови планування експериментів представлені в табл. 3.17, матриця планування – табл. 3.18, результати експериментальних досліджень – табл. 3.19.

Таблиця 3.17

Умови планування експериментів при дослідженні сумішей для  
наливних підлог

Параметр	Фактор	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
		-1	0	+1	
Пісок/ РПБ, мас	$X_1$	2	3	4	1
Вміст хлориду кальцію від маси РПБ, %	$X_2$	2	3	4	1
Вміст Melflux, % РПБ	$X_3$	0,2	0,4	0,6	0,2
Вміст Tylose, % РПБ	$X_4$	0,10	0,15	0,20	0,05
Вода/ РПБ,	$X_5$	0,40	0,45	0,50	0,05



Таблиця 3.18

Матриця планування експериментів  $Na_5$ 

№ точки	Кодовані значення факторів					Натуральні значення факторів				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	Пісок/ РПБ	Вміст хлориду кальцію, мас. %	Вміст Melflux 2651F, мас. %	Вміст Tylose, мас. %	Вода/ РПБ
1	+	+	+	+	+	4	3	0,6	0,20	0,55
2	-	-	+	+	+	2	1	0,6	0,20	0,55
3	-	+	-	-	-	2	3	0,2	0,10	0,45
4	+	-	-	-	-	4	1	0,2	0,10	0,45
5	-	+	-	+	+	2	3	0,2	0,20	0,45
6	+	-	-	+	+	4	1	0,2	0,20	0,55
7	+	+	+	-	-	4	3	0,6	0,10	0,45
8	-	-	+	-	-	2	1	0,6	0,10	0,45
9	-	+	+	+	-	2	3	0,6	0,20	0,45
10	+	-	+	+	-	4	1	0,6	0,20	0,45
11	+	+	-	-	+	4	3	0,2	0,10	0,55
12	-	-	-	-	+	2	1	0,2	0,10	0,55
13	-	+	+	-	+	2	3	0,6	0,10	0,55
14	+	-	+	-	+	4	1	0,6	0,10	0,55
15	+	+	-	+	-	4	3	0,2	0,20	0,45

продовження табл. 3.18

№ точки	Кодовані значення факторів					Натуральні значення факторів				
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	Пісок/ РПБ	Вміст хлориду кальцію, мас. %	Вміст Melflux 2651F, мас. %	Вміст Tylose, мас. %	Вода/ РПБ
16	-	-	-	+	-	2	1	0,2	0,20	0,45
17	+	0	0	0	0	4	2	0,4	0,15	0,50
18	-	0	0	0	0	2	2	0,4	0,15	0,50
19	0	+	0	0	0	3	3	0,4	0,15	0,50
20	0	-	0	0	0	3	1	0,4	0,15	0,50
21	0	0	+	0	0	3	2	0,6	0,15	0,50
22	0	0	-	0	0	3	2	0,2	0,15	0,50
23	0	0	0	+	0	3	2	0,4	0,20	0,50
24	0	0	0	-	0	3	2	0,4	0,10	0,50
25	0	0	0	0	+	3	2	0,4	0,15	0,55
26	0	0	0	0	-	3	2	0,4	0,15	0,45
27	0	0	0	0	0	3	2	0,4	0,15	0,50
28	0	0	0	0	0	3	2	0,4	0,15	0,50
29	0	0	0	0	0	3	2	0,4	0,15	0,50

Таблиця 3.19

Результати експериментальних досліджень сумішей для само-  
нівельованих підлог згідно матриці  $\text{Na}_5$

№ точ- ки	Розтічність (при витіканні з конусу Віка), мм	Термін придатності, (живучість), хв	Границя міцності, МПа					
			1 доба	3 доби	28 діб	1 доба	3 доби	28 діб
			Згин			Стиск		
1	170	115	3,25	5,41	8,87	5,19	11,20	20,09
2	220	175	3,55	6,01	11,09	7,45	14,76	19,93
3	180	125	3,43	5,21	9,53	5,91	12,14	15,93
4	155	110	2,93	3,33	5,91	3,73	8,46	14,21
5	195	145	3,55	5,39	9,61	6,53	12,94	16,73
6	175	140	2,25	2,43	4,23	2,07	6,02	10,69
7	180	130	3,33	5,31	9,27	5,93	12,12	20,77
8	230	135	3,87	6,35	11,57	7,27	14,76	21,01
9	215	130	4,25	7,53	13,19	8,55	16,30	23,15
10	185	150	2,47	3,53	5,77	3,41	8,30	14,95
11	175	150	2,83	3,61	6,69	4,59	9,76	16,27
12	195	120	3,61	5,29	9,75	5,73	12,20	15,79
13	225	180	4,05	7,11	12,75	7,69	15,14	21,87
14	200	140	3,07	4,19	7,09	4,83	10,38	17,99
15	160	135	2,67	3,47	5,93	3,61	8,48	15,11
16	185	125	3,21	4,71	8,91	5,67	11,84	14,23
17	190	140	3,00	4,20	7,54	4,68	10,17	18,06
18	215	125	3,84	6,24	11,62	7,36	14,59	20,38
19	195	115	3,30	5,40	9,64	6,12	12,47	19,34
20	195	145	3,00	4,50	8,20	5,14	11,05	16,70
21	225	140	3,33	5,73	10,06	6,37	12,98	20,22
22	185	140	2,91	4,23	7,68	4,81	10,34	15,12
23	190	143	3,18	5,05	9,10	5,71	11,88	18,32
24	195	142	3,42	5,29	9,72	6,11	12,52	19,44
25	215	167	3,18	5,05	9,26	5,80	11,28	18,52
26	185	130	3,66	5,83	10,54	6,62	14,08	21,22
27	190	135	3,24	5,13	9,34	5,88	12,15	18,79
28	195	138	3,25	5,41	8,87	5,19	11,20	20,09
29	190	132	3,55	6,01	11,09	7,45	14,76	19,93

На основі експериментальних даних одержані рівняння регресії міцності на згин та стиск самонівельованих наливних підлог на основі РПБ (3.1...3.7):

Міцність на згин у віці 1 доби, МПа:  

$$f_{m,1n}^1 = 3,24 - 0,42X_1 + 0,15X_2 + 0,21X_3 - 0,12X_4 - 0,24X_5 +$$

$$+ 0,18X_1^2 - 0,09X_2^2 - 0,12X_3^2 + 0,06X_4^2 + 0,18X_5^2 + 0,02X_1X_2 -$$

$$- 0,03X_1X_3 - 0,07X_1X_4 - 0,06X_1X_5 + 0,09X_2X_3 + 0,13X_2X_4 -$$

$$- 0,02X_2X_5 + 0,02X_3X_4 - 0,05X_3X_5 + 0,02X_4X_5$$
 (3.1)

Міцність на згин у віці 3 доби, МПа:  

$$f_{m,1n}^3 = 5,13 - 1,02X_1 + 0,45X_2 + 0,75X_3 - 0,12X_4 - 0,39X_5 +$$

$$+ 0,09X_1^2 - 0,18X_2^2 - 0,15X_3^2 + 0,04X_4^2 + 0,31X_5^2 + 0,09X_1X_2 -$$

$$- 0,05X_1X_3 - 0,08X_1X_4 - 0,10X_1X_5 + 0,21X_2X_3 + 0,19X_2X_4 -$$

$$- 0,04X_2X_5 + 0,06X_3X_4 - 0,17X_3X_5 + 0,03X_4X_5$$
 (3.2)

Міцність на згин у віці 28 діб, МПа:  

$$f_{m,1n}^{28} = 9,34 - 2,04X_1 + 0,72X_2 + 1,19X_3 - 0,31X_4 - 0,64X_5 +$$

$$+ 0,24X_1^2 - 0,42X_2^2 - 0,47X_3^2 + 0,07X_4^2 + 0,56X_5^2 + 0,25X_1X_2 -$$

$$- 0,16X_1X_3 - 0,21X_1X_4 - 0,07X_1X_5 + 0,35X_2X_3 + 0,23X_2X_4 -$$

$$- 0,05X_2X_5 + 0,09X_3X_4 - 0,22X_3X_5 + 0,13X_4X_5$$
 (3.3)

Міцність на стиск у віці 1 доби, МПа:  

$$f_m^1 = 5,88 - 1,34X_1 + 0,49X_2 + 0,78X_3 - 0,20X_4 - 0,41X_5 +$$

$$+ 0,14X_1^2 - 0,25X_2^2 - 0,29X_3^2 + 0,03X_4^2 + 0,33X_5^2 + 0,17X_1X_2 -$$

$$- 0,11X_1X_3 - 0,40X_1X_4 + 0,05X_1X_5 + 0,06X_2X_3 + 0,17X_2X_4 -$$

$$- 0,03X_2X_5 + 0,06X_3X_4 - 0,13X_3X_5 + 0,09X_4X_5$$
 (3.4)

Міцність на стиск у віці 3 доби, МПа:  

$$f_m^3 = 12,15 - 2,21X_1 + 0,78X_2 + 1,32X_3 - 0,32X_4 - 1,40X_5 -$$

$$- 0,39X_2^2 - 0,49X_3^2 + 0,05X_4^2 + 0,53X_5^2 + 0,34X_1X_2 -$$

$$- 0,16X_1X_3 - 0,52X_1X_4 + 0,08X_1X_5 + 0,11X_2X_3 + 0,29X_2X_4 -$$

$$- 0,05X_2X_5 + 0,09X_3X_4 - 0,24X_3X_5 + 0,14X_4X_5$$
 (3.5)

Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа:

$$\begin{aligned} f_m^{28} = & 18,79 - 4,16X_1 + 1,32X_2 + 2,55X_3 - 0,56X_4 - 1,35X_5 + \\ & + 0,43X_1^2 - 0,77X_2^2 - 1,12X_3^2 + 0,09X_4^2 + 1,08X_5^2 + 0,48X_1X_2 - \\ & - 0,36X_1X_3 - 0,49X_1X_4 + 0,09X_1X_5 + 0,18X_2X_3 + 0,59X_2X_4 - \\ & - 0,08X_2X_5 + 0,12X_3X_4 - 0,31X_3X_5 + 0,40X_4X_5 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Склади сумішей для матриці планування (табл. 3.18) розраховано на 1 л суміші на кожну точку, при цьому враховано, що  $\rho_{в'яз} \approx \rho_n \approx 2,80$  кг/л, де  $\rho_{в'яз}$  – дійсна густина суміші з РПБ, хлориду кальцію, Melflux 2651F і Tylose. Далі було складено систему рівнянь:

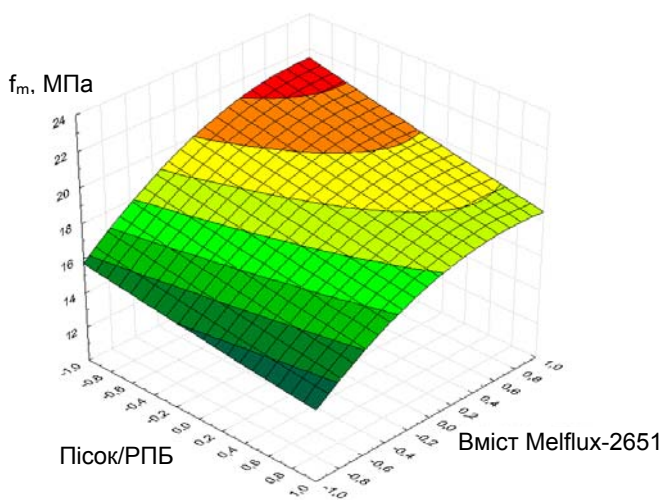
$$\begin{cases} \text{Вода} + (\text{Пісок} + (\text{в'язуче})) / 2,80 = 1\text{л} \\ \text{Пісок} / \text{РПБ} = x_1 \\ \text{Вода} / \text{РПБ} = x_5 \end{cases} \quad (3.7)$$

При складенні даної системи враховувався той факт, що сумарний об'єм хлориду кальцію, Melflux 2651F і Tylose відносно не значний, і тому зміна витрат цих компонентів по точкам матриці не вплине суттєво на величину  $\rho_{в'яз}$  і точність результатів визначення витрат компонентів. Підставляючи в систему (3.7) співвідношення Пісок/РПБ ( $x_1$ ) і Вода/РПБ ( $x_5$ ) з даних табл. 3.18 можна визначити величини витрат піску, води і РПБ. Далі, враховуючи значення  $x_2$ ,  $x_3$  і  $x_4$  (табл. 3.18) можливо розрахувати витрати всіх компонентів.

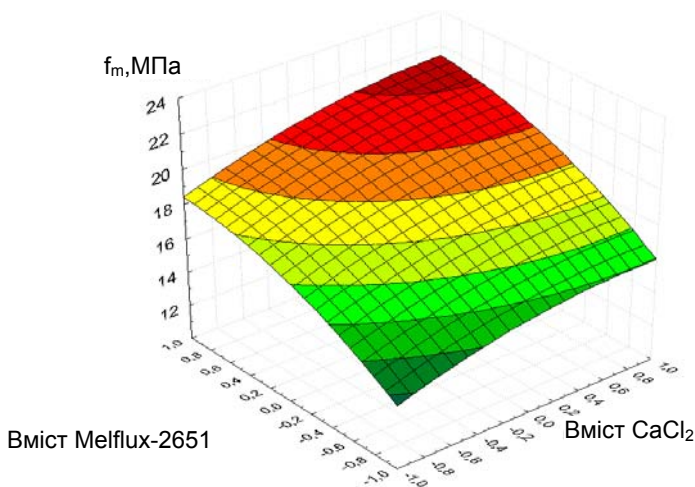
Графічні залежності міцності при стиску від технологічних факторів приведені на рис. 3.24...3.27, теж, при згині – рис. 3.28. Із зростанням тривалості зберігання міцність при згині розчинів наливних підлог на основі РПБ зростає від 4,5 до 14,3 МПа, а міцність при стиску від 8,5 до 32 МПа; при цьому водов'язуче відношення становить біля 0,40, а розтічність розчину (при витіканні з конусу Віка), знаходиться в межах 215...230 мм. Характерне сповільнене зростання міцності у перші 3 доби твердіння у нашому випадку може бути подолане за рахунок використання максимальної кількості прискорювача тузавлення – хлориду кальцію при одночасному зниженні

водопотреби розчину за рахунок застосування суперпластифікатора Melflux 2651F. Водоутримуюча здатність суміші для підлог забезпечується шляхом введення ефіру целюлози Tylose 60010 в кількості не менше 0,10%, а необхідний термін придатності розчинів – не менше 30 хв забезпечується термінами тужавлення РПБ, для якого навіть у присутності значних кількостей хлориду кальцію початок тужавлення відбувається не раніше 60 хвилин.

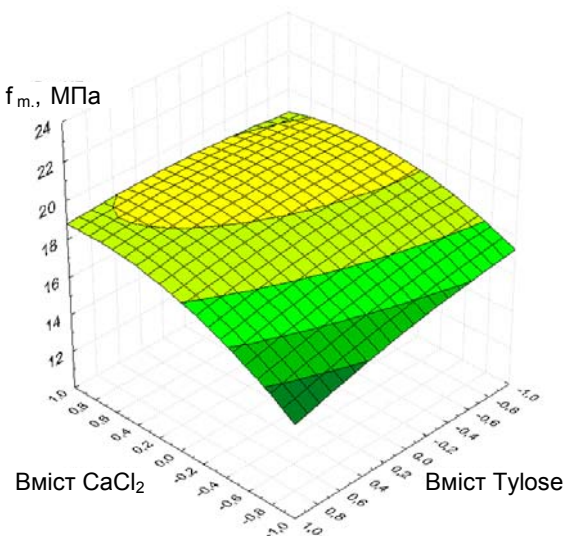
Згідно отриманих даних, розчини на основі сухих сумішей для наливних підлог за основними технічними характеристиками (міцністю, терміном придатності, розтічністю та ін.) можна віднести до групи сумішей для улаштування стяжок та покриттів підлог (СТ1, СТ2, СТ3, ПО1, ПО2, ПО3) у відповідності з класифікацією сумішей для влаштування підлог.



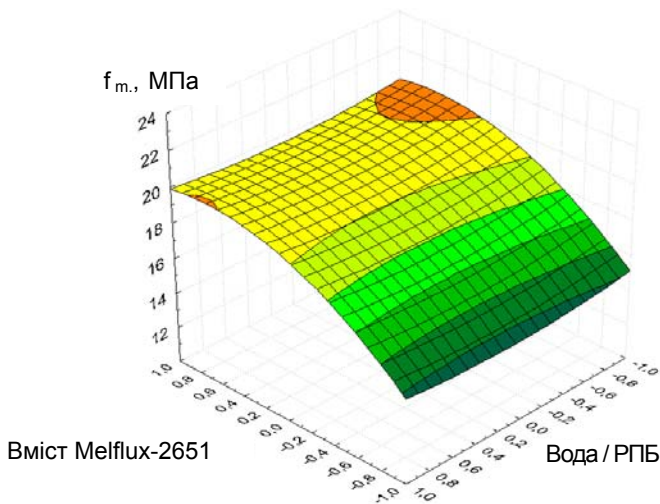
**Рис. 3.24.** Залежність міцності при стиску розчину для самонівельованих наливних підлог на основі РПБ від співвідношення піску і РПБ ( $X_1$ ) і вмісту Melflux 2651F ( $X_3$ ),  $X_2=X_4=X_5=0$ )



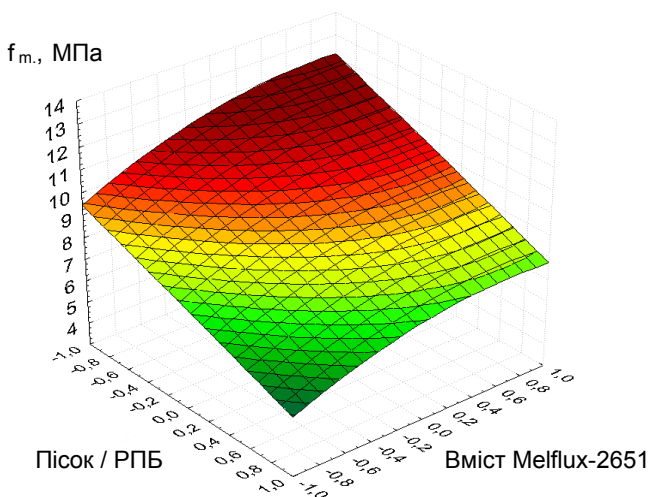
**Рис. 3.25.** Залежність міцності при стиску розчину для самонівельованих наливних підлог на основі РПБ від вмісту Melflux 2651F ( $X_3$ ) і вмісту хлориду кальцію ( $X_2$ ),  $X_1 = X_4 = X_5 = 0$ )



**Рис. 3.26.** Залежність міцності при стиску розчину для самонівельованих наливних підлог на основі РПБ від вмісту хлориду кальцію ( $X_2$ ) і вмісту Tylose ( $X_4$ ),  $X_1 = X_3 = X_5 = 0$ )



**Рис. 3.27.** Залежність міцності при стиску розчину для самонівельованих наливних підлог на основі РПБ від вмісту Melflux 2651F ( $X_3$ ) і співвідношення води і РПБ ( $X_5$ ),  
 $X_1 = X_2 = X_4 = 0$ )



**Рис. 3.28.** Залежність міцності при згині розчину для самонівельованих наливних підлог на основі РПБ від співвідношення піску і РПБ ( $X_1$ ) і від вмісту Melflux 2651F ( $X_3$ ),  $X_2 = X_4 = X_5 = 0$ )



## 3.2. Конструкційно-теплоізоляційні бетони

### 3.2.1. Склад і властивості керамзитобетонів

Аналіз наукових робіт в області реакційно-порошкових бетонів та їх виробництв в світовій практиці показує, що їх традиційна орієнтація спрямована на отримання високоміцних матриць. Такі бетони мають міцність 100-150 МПа та відрізняються високою ефективністю не тільки при будівництві цивільних будівель і споруд, але й для виробів і конструкцій оборонного призначення.

В сучасному будівництві поряд з високоміцними визначається тенденція до використання енергоефективних будівельних матеріалів і зокрема легких бетонів. Одним з основних видів легких бетонів є керамзитобетони

Для виконання експериментів були використані поряд з цементно-зольними РПБ, склад якого вказаний раніше, кварцовим піском, також керамзитовий гравій, що мав наступну характеристику: фракція 0...5 мм, насипна густина 690 кг/м<sup>3</sup> (марка 700), водопоглинання – 14.5%, міцність при стисканні у циліндри – 3,6 МПа (марка П150).

З метою вивчення впливу факторів складу на міцнісні характеристики керамзитобетону, а також встановлення оптимальних параметрів виготовлення таких бетонів, основні дослідження були виконані за допомогою експериментів, алгоритмізованих відповідно до плану В<sub>3</sub> [6]. Умови планування експериментів наведені в табл. 3.20.

В якості вихідних параметрів прийнято міцність керамзитобетону на стиск у віці 7 та 28 діб нормального твердіння  $f_{28}$  та його середня густина  $\rho_b$ , а також легкоукладальність бетонної суміші.

Таблиця 3.20

Умови планування експериментів при дослідженні  
керамзитобетонів

Фактори		Рівні варіювання факторів			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	100
Витрата РПБ, кг/м <sup>3</sup>	X <sub>1</sub>	300	400	500	0,1

продовження табл. 3.20

Фактори		Рівні варіювання факторів			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	100
В/Ц	$X_2$	0,3	0,4	0,5	
Об'ємна концентрація керамзиту, $V_k$	$X_3$	0,1	0,2	0,3	0,1

Основні експериментальні результати досліджень керамзитобетону наведені в табл. 3.21 та на рис. 3.29...3.37.

Таблиця 3.21

Експериментальні результати досліджень керамзитобетону

№. точ.	Склад бетону			Витрата води $V$ , л/м <sup>3</sup>	ОК, см	Середня густина, $\rho_b$ , кг/м <sup>3</sup>	Міцність на стиск, МПа	
	РПБ кг/м <sup>3</sup>	В/Ц	$V_k$				7 діб	28 діб
1	500	0,5	0,3	250	18	1380	7,0	18,5
2	500	0,5	0,1	250	22	1500	11,0	24,5
3	500	0,3	0,3	150	7	1350	10,0	22,0
4	500	0,3	0,1	150	9	1550	10,0	24,3
5	300	0,5	0,3	150	8	1320	5,2	13,2
6	300	0,5	0,1	150	11	1490	5,4	13,0
7	300	0,3	0,3	90	0	1330	5,9	15,1
8	300	0,3	0,1	90	1	1500	6,1	16,0
9	500	0,4	0,2	200	16	1455	9,5	18,6
10	300	0,4	0,2	120	4	1410	6,9	16,6
11	400	0,5	0,2	200	14	1460	8,1	16,7
12	400	0,3	0,2	120	4	1415	8,8	17,4
13	400	0,4	0,3	160	8	1325	7,7	16,4
14	400	0,4	0,1	160	10	1545	8,5	18,3
15	400	0,4	0,2	160	9	1425	8,4	17,1
16	400	0,4	0,2	160	10	1430	8,6	17,3
17	400	0,4	0,2	160	9	1435	8,5	17,1

Після проведення обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі

міцності на стиск та середньої густини у вигляді поліноміальних рівнянь регресії :

1. Середня густина керамзитобетону, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_0 = 1436,8 + 18,5 \cdot x_1 + 0,5 \cdot x_2 - 88 \cdot x_3 - 2,5 \cdot x_1 x_3 + 10 \cdot x_2 x_3 - 5,54 \cdot x_1^2 - 0,54 \cdot x_2^2 - 3,04 \cdot x_3^2 \quad (3.8)$$

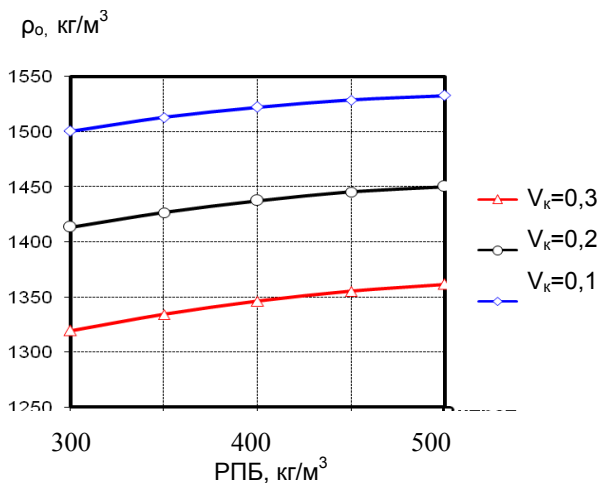
2. Міцність керамзитобетону на стиск, МПа

– у віці 7 днів:

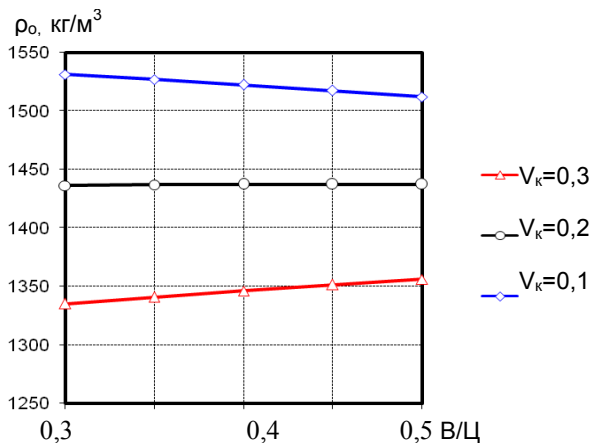
$$f_{c,m}^7 = 8,56 + 1,8 \cdot x_1 - 0,41 \cdot x_2 - 0,52 \cdot x_3 - 0,08 \cdot x_1 x_2 - 0,45 \cdot x_1 x_3 - 0,50 \cdot x_2 x_3 - 0,38 \cdot x_1^2 - 0,13 \cdot x_2^2 - 0,47 \cdot x_3^2 \quad (3.9)$$

– у віці 28 днів:

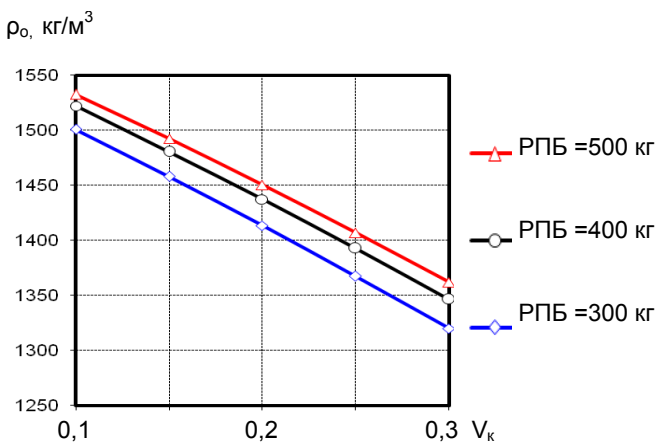
$$f_{c,m}^{28} = 17,37 + 2,31 \cdot x_1 - 0,38 \cdot x_2 - 0,59 \cdot x_3 + 0,83 \cdot x_1 x_2 - 0,31 \cdot x_1 x_3 - 0,20 \cdot x_2 x_3 + 0,14 \cdot x_1^2 - 0,44 \cdot x_2^2 - 0,10 \cdot x_3^2 \quad (3.10)$$



**Рис. 3.29.** Графік залежності середньої густини керамзитобетонних зразків, при різній об'ємній концентрації керамзиту у бетоні

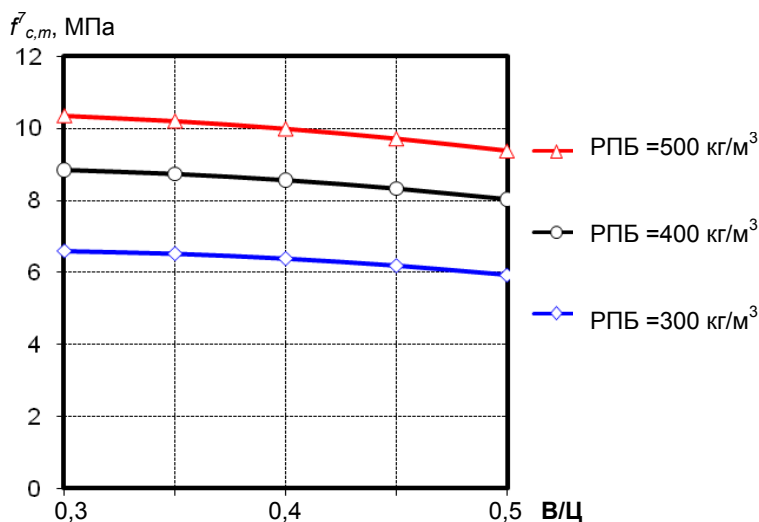


**Рис. 3.30.** Графік залежності середньої густини керамзитобетонних зразків від  $V/C$ , при різних об'ємній концентрації керамзиту у бетоні

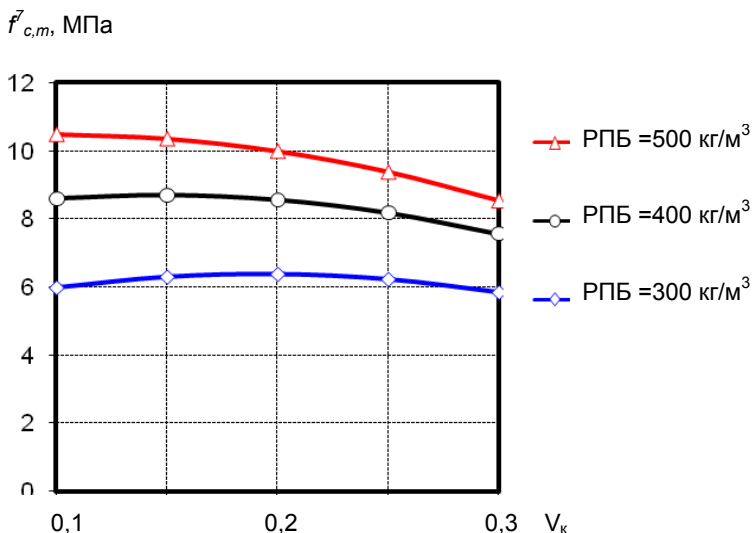


**Рис. 3.31.** Графік залежності середньої густини керамзитобетонних зразків від об'ємної концентрації керамзиту, при різному вмісті РПБ у бетоні

Аналізуючи графіки, що отримані на основі експериментально-статистичних моделей наведені на рис. 3.29-3.31 приходимо до висновку, що найбільший вплив на середню густину керамзитобетону має об'ємна концентрація керамзиту у бетоні. У меншій мірі на середню густину впливає витрата РПБ, зі збільшенням вмісту якого густина керамзитобетону збільшується. Також на середню густину керамзитобетону має незначний вплив вмісту води у бетонній суміші при збільшенні якого густина зменшується. При більшій об'ємній концентрації керамзиту збільшення вмісту води викликає незначне збільшення густини, оскільки керамзитові зерна вбирають і утримують вологу затrudнюючи випаровування води.

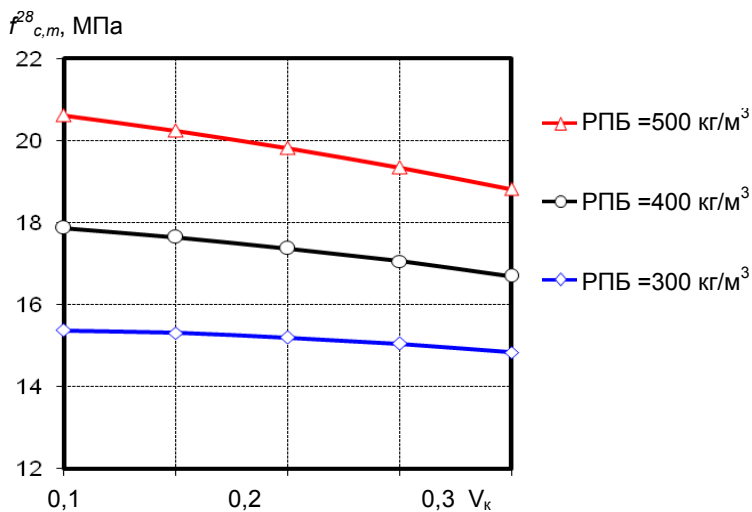


**Рис. 3.32.** Графік залежності міцності на стиск керамзитобетонних зразків у віці 7 діб від В/Ц, при різному вмісті РПБ у бетоні

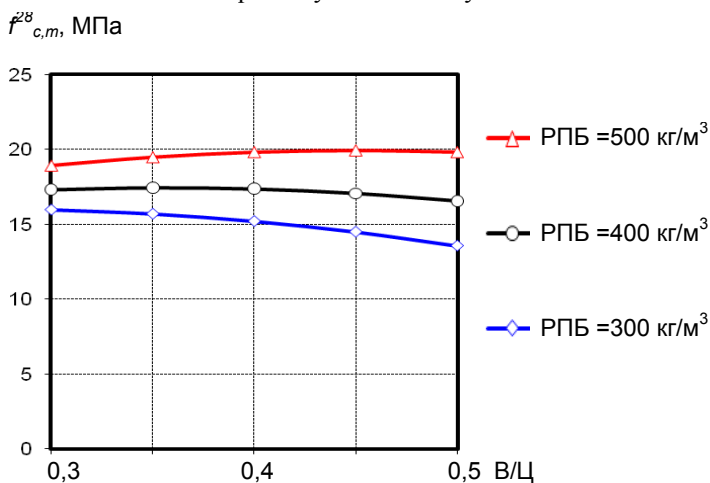


**Рис. 3.33.** Графік залежності міцності на стиск керамзитобетонних зразків у віці 7 діб від об'ємної концентрації керамзиту, при різному вмісті РПБ у бетоні

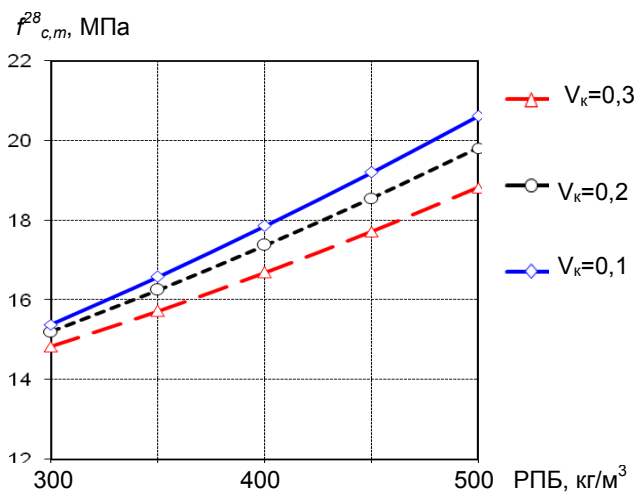
Найбільший вплив на міцність керамзитобетону у ранньому віці (7 діб) має вміст РПБ та керамзиту (об'ємної концентрації) у бетоні (рис. 3.32, 3.33). Відповідно при збільшенні вмісту РПБ практично лінійно збільшується міцність керамзитобетонних зразків, а при збільшенні вмісту керамзиту у бетоні, міцність зменшується. Витрата води в меншій мірі впливає на міцність, зі збільшенням вмісту води міцність зменшується (рис. 3.32).



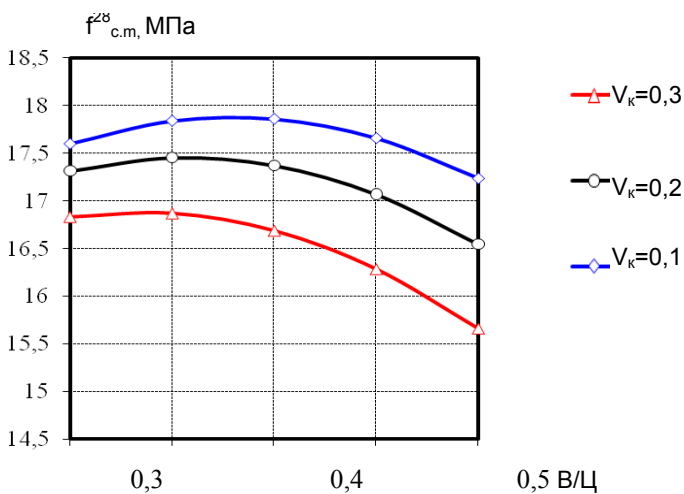
**Рис. 3.34.** Графік залежності міцності на стиск керамзитобетонних зразків у віці 28 діб від об'ємної концентрації керамзиту, при різному вмісті РПБ у бетоні



**Рис. 3.35.** Графік залежності міцності на стиск керамзитобетонних зразків у віці 28 діб від В/Ц, при різному вмісті РПБ у бетоні



**Рис. 3.36.** Графік залежності міцності на стиск керамзитобетонних зразків у віці 28 діб від витрати РПБ, при різній об'ємній концентрації керамзиту



**Рис. 3.37.** Графік залежності міцності на стиск керамзитобетонних зразків у віці 28 діб від В/Ц, при різній об'ємній концентрації керамзиту



Аналізуючи графіки, наведені на рис. 3.33-3.37 приходимо до висновку, що найбільш суттєвий вплив на міцність керамзитобетону у віці 28 діб має вміст РПБ. Відповідно при збільшенні частки РПБ у бетоні утворюється більш щільніший каркас, що супроводжує збільшення міцності керамзитобетонних зразків. При цьому більш значний ефект спостерігається при мінімальній об'ємній концентрації керамзиту. В свою чергу кількість керамзиту (об'ємна концентрація) у бетоні також чинить значний вплив на марочну міцність. При збільшенні його частки, міцність зменшується оскільки при більшій об'ємній концентрації керамзиту у бетоні утворюється каркас із легкого заповнювача, який саме і руйнується.

В/Ц має неоднозначний вплив на міцність керамзитобетону. Більш суттєвий вплив спостерігається при підвищеній об'ємній концентрації керамзиту  $V_k=0,3$ , при збільшенні В/Ц з 0,3 до 0,5 міцність зменшується на 10...15%. Однак при зменшенні частки керамзиту до 0,1 міцність суттєво не зменшується.

**Рекомендовані склади керамзитобетонів на основі РПБ.** На основі отриманих експериментальних даних були запропоновані склади керамзитобетонів В10...В25.

Таблиця 3.22

Рекомендовані склади керамзитобетонів

№ з/п	Клас бетону	$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	Витрата компонентів на 1 м <sup>3</sup> керамзитобетону			Витрата води, л
			РПБ, кг	П, кг	Об'ємна концентрація керамзиту, $V_k$	
1	В25	1550	500	760	0,1	200...220
2	В20	1550	400	760	0,1	200...220
3	В15	1450	300	840	0,2	220...230
4	В10	1350	300	900	0,3	230...240

### 3.2.2. Склад і властивості полістиролбетонів

**Передумови використання реакційно порошкових бетонних сумішей РПБ у якості компонента полістиролбетону.** Нормативне підвищення рівня теплозахисних властивостей зовнішніх стін у три рази і більше призвело до повсюдного зведенню багат шарових стін із внутрішнім або зовнішнім розташуванням малотеплопроводних утеплювачів з полістирольних або мінераловатних плит типу "сендвіч". У той же час така конструкція стін з урахуванням природної мінливості властивостей утеплювачів в період експлуатації і безлічі кріплень, що знижують конструктивну і теплотехнічну однорідність стін до 0,6-0,7 ("містки холоду"), потенційно не може бути і не є довговічною. Це викликає необхідність розробки і впровадження в практику будівництва нових матеріалів і конструкцій з високими теплозахисними характеристиками.

До числа найбільш ефективних конструкційно-теплоізоляційних матеріалів можна віднести ніздрюваті бетони і полістиролбетон.

Хороші теплоізоляційні та конструкційні властивості ніздрюватих бетонів поєднуються в них з високою гігроскопічністю, підвищеною усадкою (особливо у неавтоклавних пінобетонах) і обмеженими можливостями обробки поверхні [16; 17].

Полістиролбетон (ПСБ) відрізняється від ніздрюватого бетону в першу чергу властивостями заповнювача. Пінополістирольний заповнювач набагато легше традиційних заповнювачів (керамзиту, перліту, вермикуліту), володіє помітно меншим водопоглинанням і теплопровідністю [18].

Основним недоліком полістиролбетону є розшаровування суміші, яке зумовлене низькою адгезією в'язучого до пінополістиролу. Ця технологічна проблема зазвичай вирішується введенням до складу суміші кремнеземистого наповнювача. Підвищення густини матеріалу, при цьому, супроводжується погіршенням теплозахисних властивостей. Одним з напрямків вирішення цієї проблеми є використання

реакційно порошкових бетонних сумішей з зольними наповнювачем. Особливо ефективним є застосування суперпластифікаторів спільно з високодисперсними мінеральними добавками (у складі РПБ Melflux+зола-виносу) , на основі яких можна отримати композиції, що володіють високою міцністю і довговічністю [19]. При цьому ключовим аспектом ефективності мінеральних добавок є їх реакційна здатність, обумовлена хімічним і мінеральним складом, дисперсністю, ступенем аморфності основних сполук – оксидів кремнію і алюмінію [8].

**Дослідження впливу факторів складу на властивості полістиролбетону.** Визначення впливу витрати РПБ та добавки суперпластифікатора на міцність на стиск та згин, середню густину та на коефіцієнт конструктивної якості полістиролбетону було проведено за допомогою математичного планування експерименту. При цьому був реалізований двохфакторний трирівневий план  $B_2$ . В якості варійованих факторів прийняті наступні:

$x_1$  – витрата РПБ (РПБ,  $\text{кг/м}^3$ );

$x_2$  – вміст суперпластифікатора Melflux (СП, % від РПБ).

Умови планування якого наведені в табл. 3.23.

Таблиця 3.23

Умови планування експерименту

Фактори		Рівні варіювання факторів			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Витрата РПБ, $\text{кг/м}^3$	$x_1$	250	300	350	50
Вміст Melflux, СП, %	$x_2$	0,5	1,0	1,5	0,5

У ході досліджень в кожній точці плану для оцінки впливу факторів на міцність та густину полістиролбетону виготовляли стандартні зразки-куби ( $10 \times 10$  см), що тверділи у нормальних умовах. Визначали міцність зразків-кубів на стиск у віці 28 діб. Матриця планування та отримані експериментальні результати представлені в табл. 3.24.

Таблиця 3.24

Матриця планування та експериментальні результати

Кодовані значення факторів		Натуральні значення факторів		Середня густина, кг/м <sup>3</sup>	Міцність на згин, МПа	Міцність на стиск, МПа	ККЯ*
x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>				
1	1	350	1,5	545	1,45	3,74	7,11
1	-1	350	0,5	526	1,25	3,49	6,77
-1	1	250	1,5	515	1,00	2,21	4,46
-1	-1	250	0,5	496	0,90	1,96	3,66
1	0	350	1,0	534	1,32	3,57	7,03
-1	0	250	1,0	508	0,91	2,13	3,99
0	1	300	1,5	532	1,40	3,57	6,91
0	-1	300	0,5	517	1,20	2,89	5,53
0	0	300	1,0	523	1,24	3,09	5,89
0	0	300	1,0	525	1,25	3,09	5,93
0	0	300	1,0	522	1,26	3,08	5,91

**Примітка.** \* – відношення міцності бетону на стиску у віці 28 діб до його середньої густини МПа/(кг/м<sup>3</sup>)×10<sup>-3</sup>.

Після проведення обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі у вигляді поліноміальних рівнянь регресії, які наведені в табл. 3.25.

Таблиця 3.25

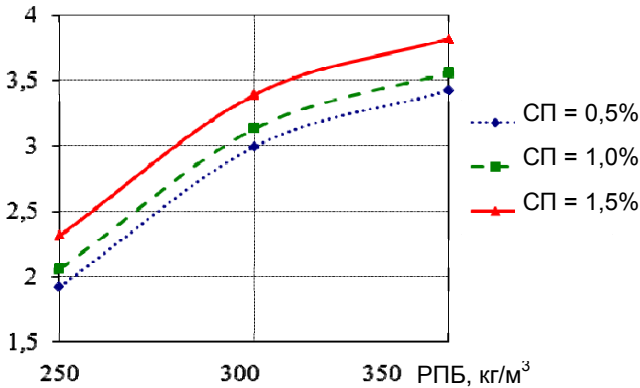
Статистичні моделі міцності полістиролбетону

Вихідні параметри	Статистичні моделі
Середня густина, кг/м <sup>3</sup>	$\rho = 524 + 14,3 \cdot x_1 + 8,84 \cdot x_2 + 3,77 \cdot x_1^2 + 0,03 \cdot x_2^2$ (3.11)
Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа	$f_c = 3,13 + 0,75 \cdot x_1 + 0,2 \cdot x_2 - 0,32 \cdot x_1^2 + 0,06 \cdot x_2^2$ (3.12)
Міцність на згин у віці 28 діб, МПа	$f_{c, y} = 1,25 + 0,2 \cdot x_1 + 0,08 \cdot x_2 + 0,03 \cdot x_1 x_2 - 0,14 \cdot x_1^2 + 0,04 \cdot x_2^2$ (3.13)
ККЯ	$ККЯ = 5,97 + 1,47 \cdot x_1 + 0,45 \cdot x_2 - 0,11 \cdot x_1 x_2 - 0,56 \cdot x_1^2 + 0,14 \cdot x_2^2$ (3.14)

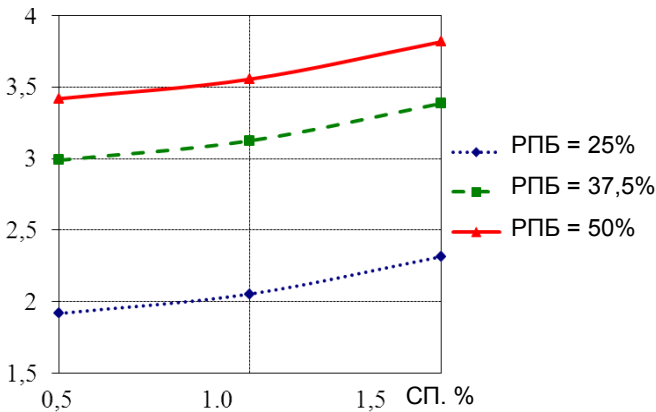
Як і очікувалось, на густину, міцність на стиск та ККЯ більш суттєвим фактором є витрата РПБ.

Графічні залежності, які відображають міцність на стиск, наведені на рис. 3.38, згин – 3.39, середню густину на рис. 3.40, та ККЯ – рис. 3.41.

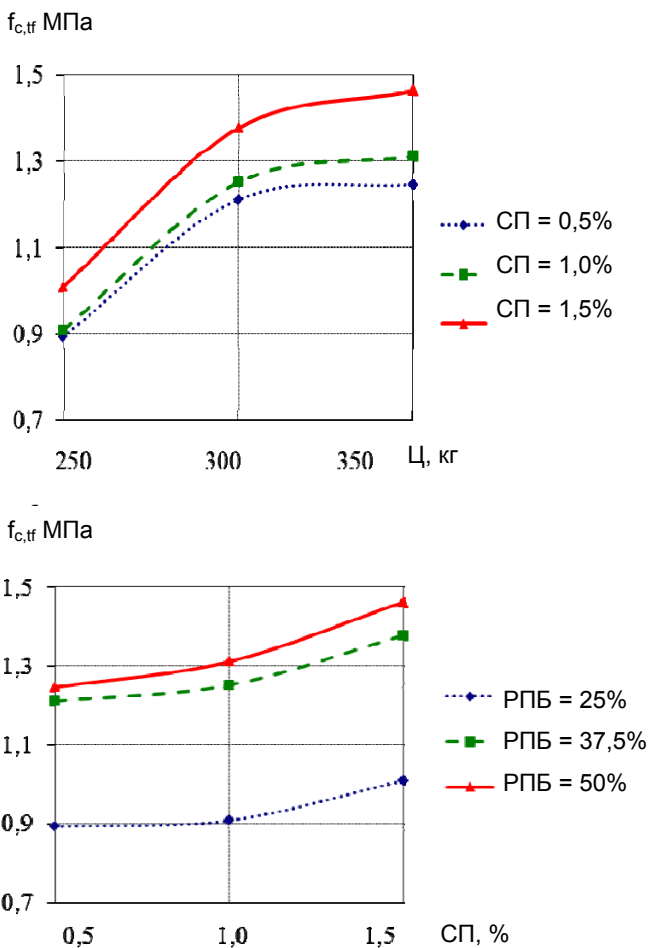
$f_c$ , МПа



$f_c$ , МПа



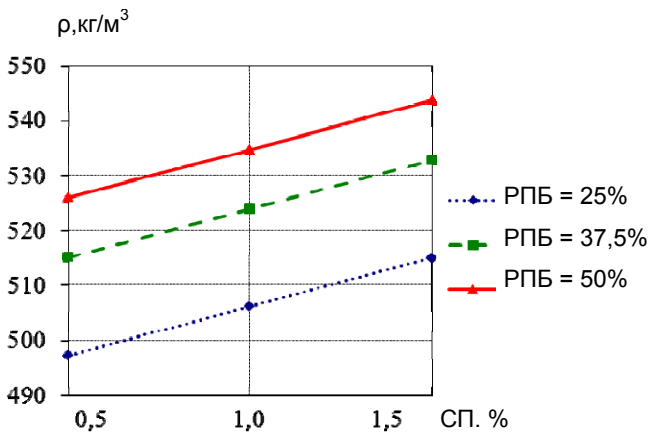
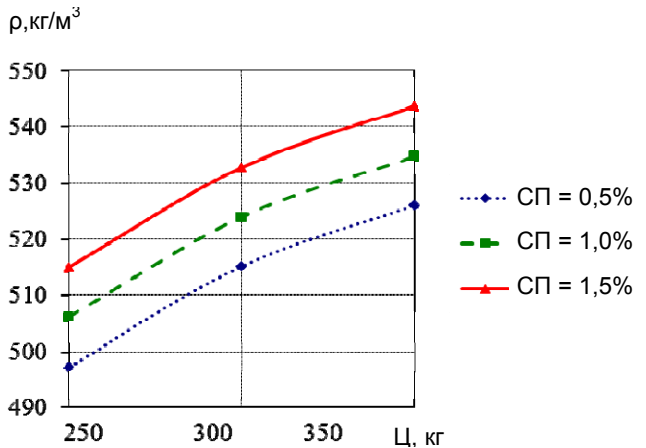
**Рис. 3.38.** Залежність міцності полістиролбетону на стиск від факторів складу



**Рис. 3.39.** Залежність міцності полістиролбетону на згин від факторів складу

Аналіз графічних залежностей міцності на стиск та згин, що приведені на рис. 3.38 та 3.39 свідчить, що збільшення витрати РПБ з 250 кг до 350 кг спричиняє збільшення міцності на стиск та згин на 50...60%. Вміст добавки

суперпластифікатора більше відображається на міцності при згині. Максимальна міцність на стиск становить 3,7 МПа та згин 1,45 МПа при максимальній витраті РПБ і вмісті суперпластифікатора.



**Рис. 3.40.** Залежність середньої густини полістиролбетону від факторів складу

Аналіз графічних залежностей, які приведені на рис. 3.40 дозволяє зробити висновок, що збільшення витрати РПБ з 250 кг

до 350 кг на 1 м<sup>3</sup> бетонної суміші спричиняє збільшення густини з 495...515 кг/м<sup>3</sup> до 530...545 кг/м<sup>3</sup> незалежно від витрати добавки суперпластифікатора. Мінімальна густина – 496 кг/м<sup>3</sup> досягається при мінімальній витраті РПБ і добавки. Максимальна – 545 кг/м<sup>3</sup> забезпечується при витраті РПБ 350 кг/м<sup>3</sup> і вмісті суперпластифікатора 1,5%.

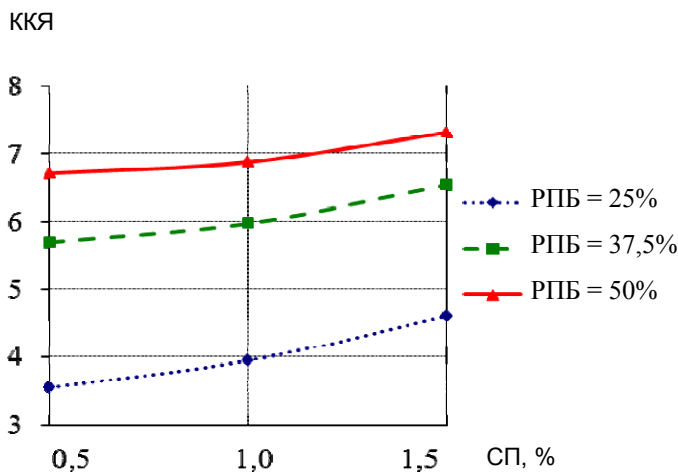
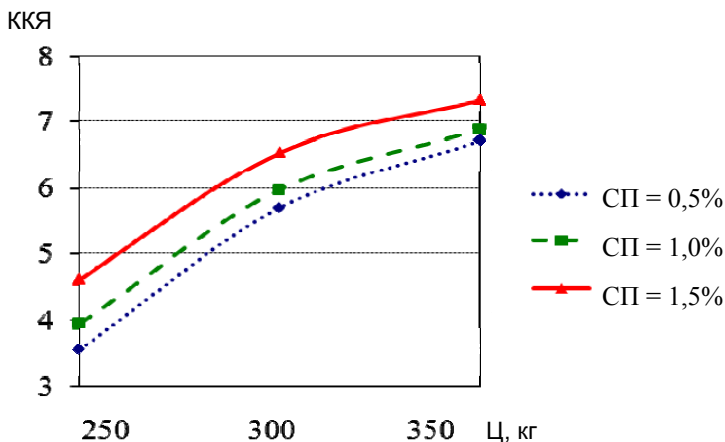


Рис. 3.41. Залежність ККЯ від факторів складу



Аналізуючи графічні залежності, що наведені на рис. 3.41, можна відзначити, що суттєве збільшення коефіцієнта конструктивної якості спостерігається при збільшенні витрати РПБ з  $250 \text{ кг/м}^3$  до  $300 \text{ кг/м}^3$ , подальше збільшення дає мінімальний ріст ККЯ. Суперпластифікатор має більш вагомий вплив при підвищеному дозуванні ( $1,0 \dots 1,5\%$ ).

*Дослідження впливу хімічних добавок на міцнісні показники полістиролбетону на основі РПБ.* Для визначення впливу хімічних добавок на міцнісні показники полістиролбетону було використано метод математичного планування експерименту. При цьому був реалізований трирівневий трьохфакторний план  $B_3$  [6] експериментів де в якості варійованих були прийняті наступні фактори:

$X_1$  – витрата РПБ (РПБ,  $\text{кг/м}^3$ );

$X_2$  – вміст суперпластифікатора (Melflux, %);

$X_3$  – вміст повітрявтягувальної добавки (ПВ, %).

Умови планування якого наведені в табл.3.26.

Таблиця 3.26

Умови планування експериментів

Фактори		Рівні варіювання факторів			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Витрата РПБ, $\text{кг/м}^3$	$x_1$	250	300	350	50
Вміст Melflux, СП, %	$x_2$	0,5	1	1,5	0,5
Вміст повітрявтягувальної добавки, ПВ, %.	$x_3$	0,5	1	1,5	0,5

У ході досліджень в кожній точці плану для оцінки впливу факторів на міцність та густину полістиролбетону виготовляли стандартні зразки-куби ( $10 \times 10 \text{ см}$ ), що тверділи у нормальних умовах. Визначали міцність зразків-кубів на стиск та згин у віці 28 діб, середню густину та ККЯ. Матриця планування та отримані експериментальні результати представлені в табл. 3.27.

Таблиця 3.27

Матриця планування та експериментальні результати

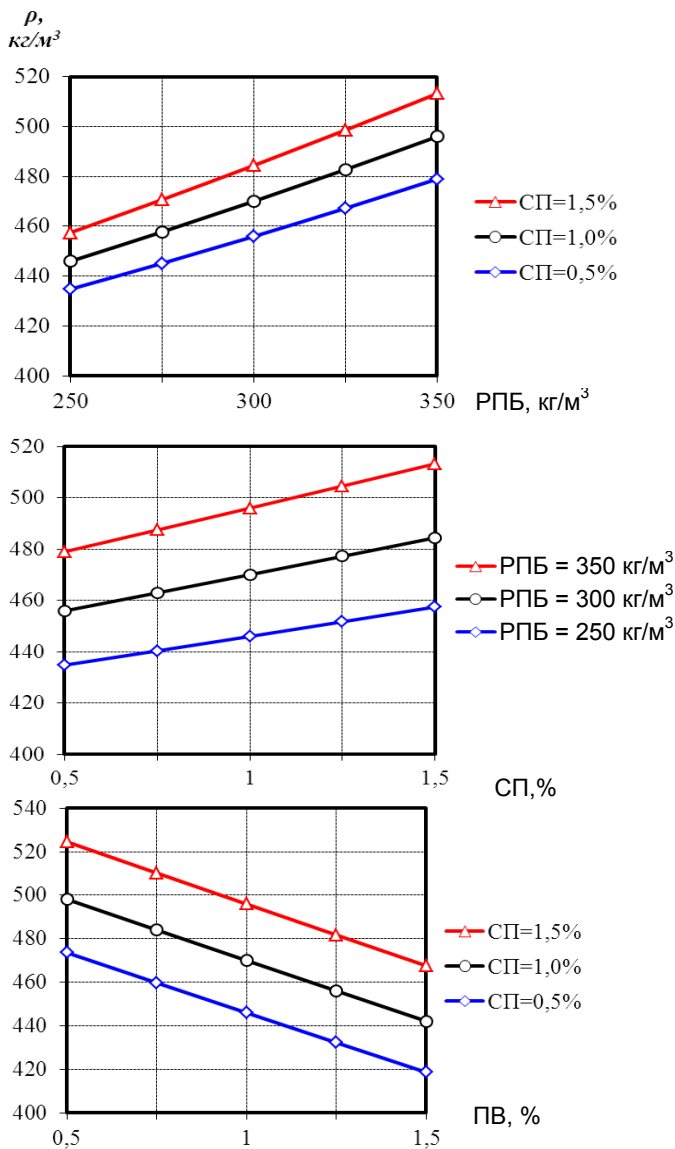
№	Фактори			Вміст компонентів, кг/м <sup>3</sup>			В/Ц	Вода, л	Середня густина, кг/м <sup>3</sup>	Міцність, МПа		ККЯ МПа/(кг/м <sup>3</sup> ) × 10 <sup>-3</sup>
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	РПБ	СП	ІПВ				при стиску	при згині	
1	1	1	1	350	1,75	5,25	0,42	146	537	3,98	1,75	7,41
2	1	1	-1	350	1,75	1,75	0,42	146	404	3,35	1,39	8,29
3	1	-1	1	350	0,35	5,25	0,42	146	443	3,76	1,58	8,48
4	1	-1	-1	350	0,35	1,75	0,45	159	430	2,47	1,27	5,75
5	-1	1	1	250	1,25	3,75	0,58	146	509	3,12	1,37	6,13
6	-1	1	-1	250	1,25	1,25	0,64	159	493	2,07	0,87	4,20
7	-1	-1	1	250	0,25	3,75	0,62	156	546	2,31	1,17	4,23
8	-1	-1	-1	250	0,25	1,25	0,62	156	411	1,89	0,82	4,60
9	1	0	0	350	1,05	3,5	0,45	158	418	3,56	1,49	8,51
10	-1	0	0	250	0,75	2,5	0,58	146	520	2,21	1,05	4,25
11	0	1	0	300	1,5	3	0,50	151	483	2,54	1,1	5,26
12	0	-1	0	300	0,3	3	0,51	153	454	2,83	1,28	6,24
13	0	0	1	300	0,9	4,5	0,51	152	462	2,45	0,92	5,30
14	0	0	-1	300	0,9	1,5	0,51	152	474	2,98	1,33	6,28
15	0	0	0	300	0,9	3	0,51	152	470	2,68	1,2	5,71

Статистична обробка експериментальних даних дозволила отримати математичні моделі властивостей полістиролбетону на основі РПБ у вигляді поліноміальних рівнянь регресії, які наведені в табл. 3.28.

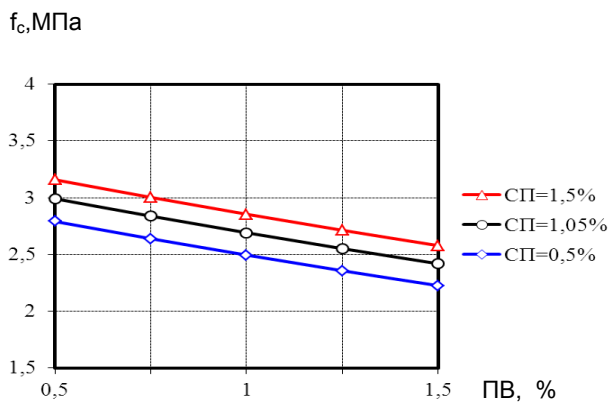
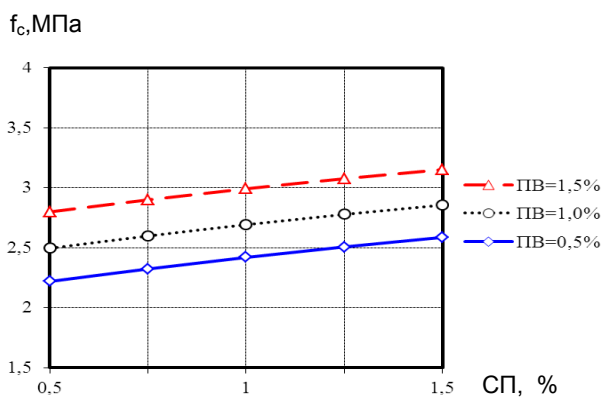
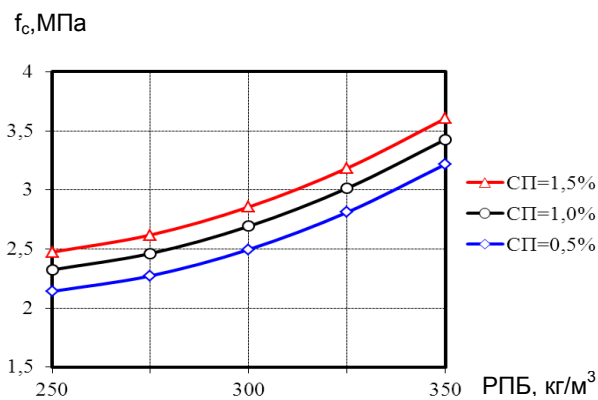
Таблиця 3.28

Статистичні моделі міцності та густини полістиролбетону

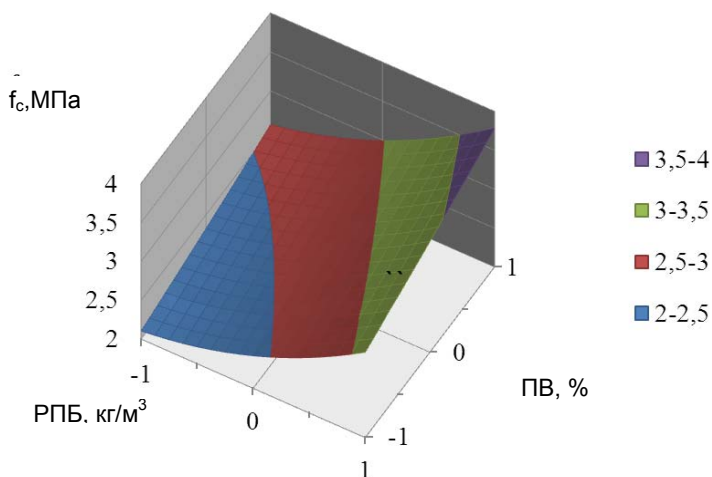
Вихідні параметри	Статистичні моделі
Середня густина, кг/м <sup>3</sup>	$\rho = 470 + 26,6 \cdot x_1 + 14,2 \cdot x_2 - 28,5 \cdot x_3 + 0,95 \cdot x_1^2 + 0,15 \cdot x_2^2 + 0,25 \cdot x_3^2 + 2,9 \cdot x_1 x_2 - 0,5 \cdot x_1 x_3 + 0,1 \cdot x_2 x_3 \quad (3.15)$
Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа	$f_{c.m} = 2,69 + 0,55 \cdot x_1 + 0,18 \cdot x_2 - 0,29 \cdot x_3 + 0,18 \cdot x_1^2 - 0,02 \cdot x_2^2 + 0,01 \cdot x_3^2 + 0,0 \cdot x_1 x_2 - 0,06 \cdot x_1 x_3 \quad (3.16)$
Міцність на згин у віці 28 діб, МПа	$f_{c.m} = 1,18 + 0,22 \cdot x_1 + 0,04 \cdot x_2 + 0,211 \cdot x_3 + 0,1 \cdot x_1^2 + 0,02 \cdot x_2^2 - 0,04 \cdot x_3^2 + 0,03 \cdot x_1 x_3 + 0,03 \cdot x_2 x_3 \quad (3.17)$
ККЯ	$ККЯ = 5,8 + 1,5 \cdot x_1 + 0,2 \cdot x_2 + 0,25 \cdot x_3 + 0,52 \cdot x_1^2 - 0,1 \cdot x_2^2 - 0,06 \cdot x_3^2 + 0,04 \cdot x_1 x_3 - 0,16 \cdot x_2 x_3 \quad (3.18)$



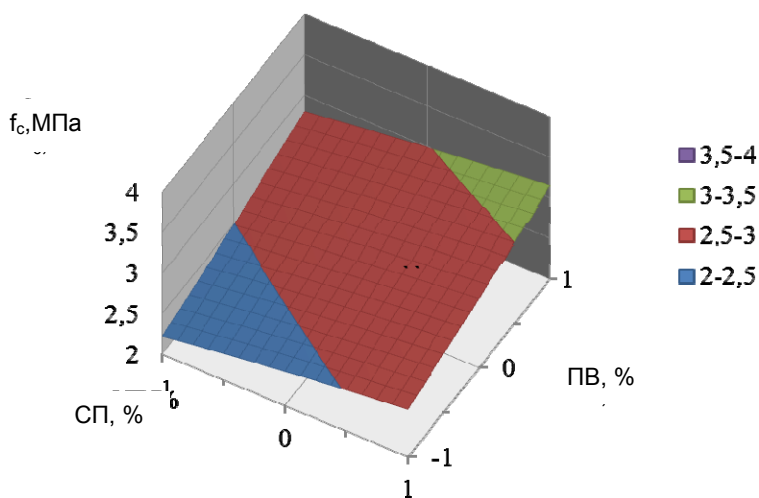
**Рис. 3.42.** Залежність середньої густини полістиролбетону від факторів складу



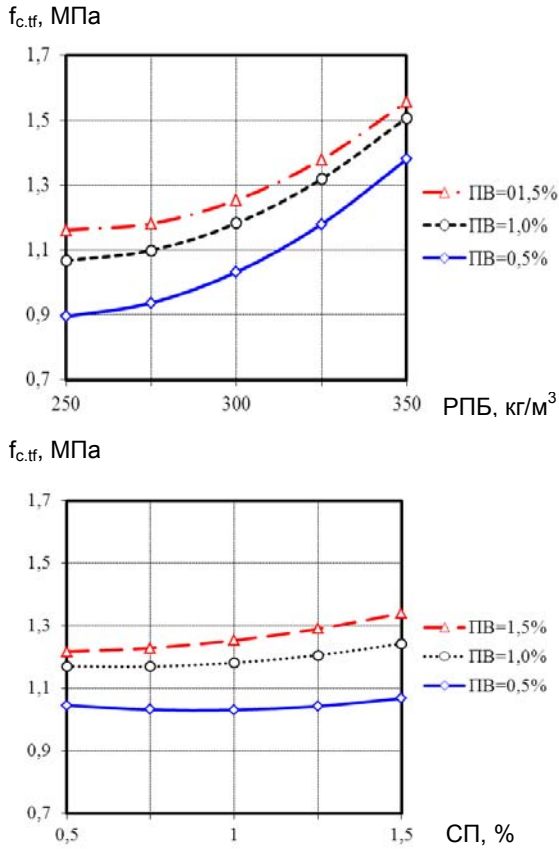
**Рис. 3.43.** Залежність міцності полістиролбетону на стиск від факторів складу



**Рис. 3.44.** Поверхня відгуку міцності полістиролбетону на стиск від вмісту РПБ та повітрягивальної дабвки



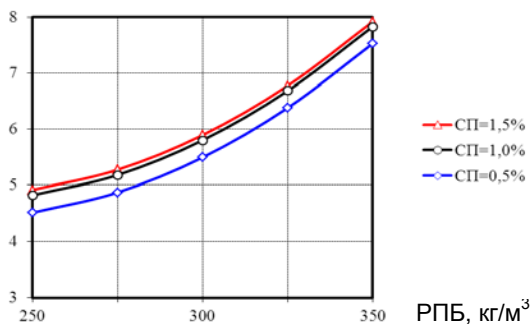
**Рис. 3.45.** Поверхня відгуку міцності полістиролбетону на стиск від вмісту дабавок



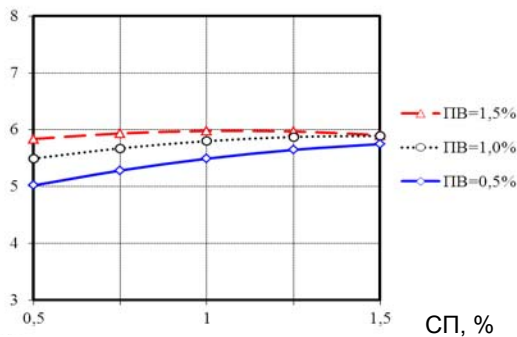
**Рис. 3.46.** Залежність міцності полістиролбетону на згин від факторів складу

Аналіз отриманих моделей (табл. 3.28) показує, що найбільше на зміну середньої густини полістиролбетону впливають витрата поризатора (фактор  $x_3$ ) та вміст РПБ (фактор  $x_1$ ). Звертає на себе увагу досить значний ефект взаємодії факторів  $x_1$  та  $x_2$ , який показує, що одночасна зміна цих факторів підсилює їх інтегральну дію. Певна взаємодія є між факторами  $x_1$  та  $x_3$ , тобто вмістом добавок, але менш суттєва.

ККЯ, МПа / (кг/м<sup>3</sup>)



ККЯ, МПа / (кг/м<sup>3</sup>)



ККЯ, МПа / (кг/м<sup>3</sup>)

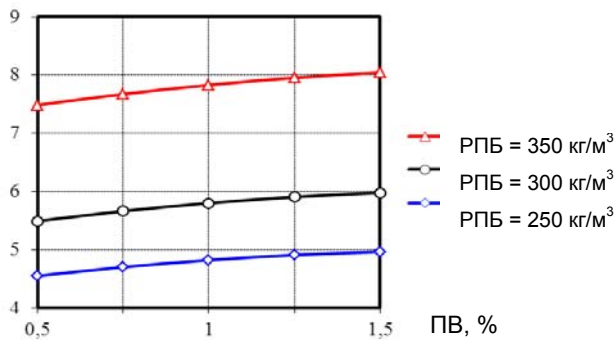


Рис. 3.47. Залежність ККЯ від факторів складу



В отриманих поліноміальних моделях міцності при стиску у віці 28 діб найбільший вплив мають вміст РПБ та витрата поризатора. В моделях міцність при згині у віці 28 діб має місце подібний вплив факторів.

ККЯ залежить в першу чергу від витрати РПБ та в деякій мірі від добавок.

Аналіз графіків, що характеризують середню густину, наведених на рис. 3.42 дозволяє зробити висновок, що збільшення витрати РПБ в досліджуваному діапазоні спричиняє збільшення густини з 435...455 кг/м<sup>3</sup> до 480...515 кг/м<sup>3</sup>, при цьому зі збільшенням від витрати добавки суперпластифікатора густина підвищується.

Збільшення витрати повітрявтягувальної добавки дозволяє зменшити середню густину до 420 кг/м<sup>3</sup> при мінімальному вмісті РПБ та суперпластифікатора.

Аналіз отриманих графічних залежностей (рис. 3.43) та поверхонь відгуку (рис. 3.44, 3.45), які ілюструють вплив факторів на міцність полістиролбетону на стиск у віці 28 діб свідчить, що збільшення витрати РПБ з 250 кг до 350 кг спричиняє збільшення міцності на стиск з 2...2,5 до 3...3,5 МПа. Збільшення кількості поризатора зумовлює закономірне зниження міцності на 20...25%. Вміст добавки суперпластифікатора більше відображається на міцності при згині.

Аналізуючи отримані графічні залежності міцності та згин (рис. 3.45) можна зробити висновок, що витрата РПБ має найбільш суттєвий вплив. При збільшенні РПБ до 350 кг міцність досягає 1,5 МПа.

Максимальна міцність на стиск становить 3,7 МПа та згин 1,55 МПа при максимальній витраті РПБ і вмісті суперпластифікатора та мінімальному вмісті добавки поризатора.

Суттєве збільшення коефіцієнта конструктивної якості спостерігається при збільшенні витрати РПБ до 350 кг/м<sup>3</sup> (рис. 3.46). Суперпластифікатор та поризатор мають більш вагомий вплив при підвищеному дозуванні (1,0...1,5%).

Приклади розрахункових складів полістиролбетону з використанням РПБ приведені в табл. 3.29, а задача може бути вирішена за наступним алгоритмом наведеним нижче.

Таблиця 3.29

Розрахункові склади полістиролбетону\*

№	Витрата складових, кг/м <sup>3</sup> бетону			Густина в сухому стані, кг/м <sup>3</sup> , $\rho_{б,с}$	Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа, $f_{cm}$
	РПБ	Вода	ППС, м <sup>3</sup>		
1	350	186	0,95	487	1,15
2	300	170	0,95	444	0,85
3	300	170	0,95	446	0,71
4	350	186	0,75	513	1,15
5	350	186	0,75	492	1,1
6	350	170	0,75	508	1,2
7	350	170	0,75	514	1,22
8	300	186	0,75	465	0,7

\* У полістиролбетон не вводився пісок і дисперсний наповнювач

### ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ III

1. Реакційно-порошкові бетони можуть слугувати не лише основним конструкційним матеріалом при зведенні будівель та споруд, а також напівфабрикатом для отримання сухих будівельних сумішей для будівельних розчинів і бетонів різного призначення.

2. В результаті експериментальних досліджень і аналізу відповідних експериментально-статистичних моделей розроблено комплекс таких сумішей з покращеними властивостями.

3. Зокрема, при коректуванні складу РПБ добавками можна отримати ремонтні та гідроізоляційні суміші з підвищеними міцнісними, деформативними та адгезійними властивостями.

4. Збільшення кількості РПБ від 400 до 800 кг призводить до збільшення 1-ої добової міцності на стиск в 1,8...2 рази, а 28-и добової в 2,4 рази. Для міцності при згині, приріст міцності,

що зумовлений збільшенням витрати РПБ, менш вагомий і становить 50...60% та 70...80% – відповідно при вмісті РПП 1% та 2%. Як випливає з характеру взаємодії підвищений вміст полімерної добавки більш позитивно впливає на міцність розчину на згин при меншій витраті РПБ.

5. Суперпластифікатор Melflux у складі суміші позитивно впливає на адгезію розчинів як в результаті зміни їх поверхневої енергії, так і в результаті зміни якісних характеристик контактного шару, насамперед в результаті збільшення його змочуваності і зменшення вмісту надлишкової вологи.

6. Введення полімерної добавки на основі вінілового ефіру версатієвої кислоти (Neolith P4400) при додатковому коректуванні вмісту золи та піску дозволяє отримати суміші для гідроізоляційних розчинів з маркою по водонепроникності до W10.

7. Виконані дослідження показали, що пропонувані РПБ доцільно використовувати в якості напівфабрикату поризованих розчинів на основі сухих будівельних сумішей. У випадку використання в якості заповнювача сумішей золи-виносу міцність розчинів досягається 15...20 МПа при середній густині 1200...1400 кг/м<sup>3</sup> та 20...25 МПа при середній густині – 1350...1550 кг/м<sup>3</sup> і використанні кварцового піску. Для досягнення вказаної середньої густини вміст у сухій суміші пороутворювача UFAPORE CC 85 повинен становити 0,04...0,11%. Введення прискорювача твердіння дозволяє отримати поризовані розчини з міцністю, яка вища на 10% від міцності розчинів без Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

8. Досліджені та підібрані суміші для наливних підлог на основі РПБ, які при високій розтічності мають міцність на стиск до 30 МПа при міцності на згин до 14 МПа і характеризуються достатньою водоутримуючою здатністю і терміном придатності.

9. Поряд з розчиновими сумішами різного призначення на основі РПБ можна виготовляти легкі бетони. Розроблені на основі РПБ склади конструкційно-теплоізоляційного керамзитобетону і теплоізоляційного полістиролбетону.

### Література до розділу III (п. 8-9)

1. Голунов С. А. Модификация плиточных клеев редисперсионными полимерными порошками VINNAPAS. *Строительные материалы*. 2004, № 3.
2. Рунова Р. Ф., Носовський Ю. Л. Технологія модифікованих будівельних розчинів. К. : Видавництво КНУБіА, 2007. 256 с.
3. Сучасні композиційні будівельно-оздоблювальні матеріали / Захарченко П. В., Долгий Е. М., Галаган Ю. О. та ін. К., 2005. 512 с.
4. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Основы бетоноведения. М. : С-Петербург, 2006. 692 с.
5. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. М. 1998. 768 с.
6. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Житковський В. В. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту. Рівне : НУВГП, 2011. 174 с.
7. Дворкін Л. Й., Рунова Р. Ф., Дворкін О. Л., Носовський Ю. Д. В'язучі речовини. Київ : «Основа», 2012. 448 с.
8. Дворкин Л. И., Соломатов В. И., Выровой В. Н. Цементные бетоны с минеральными наполнителями. К. : Будівельник, 1991. 136 с.
9. Дворкін Л. Й., Гоц В. І., Дворкін О. Л. Випробування бетонів і розчинів. Проектування їх складів : навч. посіб. 2014. 397 с.
10. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Основы бетонознaвства. К. : Основа, 2007. 616 с.
11. Стольников В. В. Исследования по гидротехническому бетону. М. : Госэнергоиздат, 1962. 330 с.
12. Стольников В. В., Литвинов Р. Е. Трещиностойкость бетона. М. : Энергия, 1972. 113 с.
13. Сергеев А. М. Полимерные композиции для наливных полов *Строительные материалы*. 2000. № 3. С. 18–19.
14. Попов К. Н., Каддо М. Б. Самовыравнивающиеся безусадочные полимерцементные композиции для покрытия полов. *Строительные материалы*. 2000. № 3. С. 42–43.

15. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Риженко І. М. Модифіковані литі бетони для самонівельованих. *Строительные материалы и изделия*. № 1. 2014. С. 10–12.
16. Горлов Ю. П., Меркин А. П., Устенко А. А. Технология теплоизоляционных материалов. М. : Стройиздат, 1980. 399 с.
17. Горяйнов К. Э., Горяйнова С. К. Технология теплоизоляционных материалов и изделий. М. : Стройиздат, 1982. 376 с.
18. ДБН В.2.6 – 31:2016. Теплова ізоляція будівель. Київ, 2006.
19. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л., Корнейчук Ю. А. Эффективные цементно-золяные бетоны. Ровно, 1998. 195 с.
20. Рахманов В. А. Особо легкий полистиролбетон строительной системы “Юникон”. М. : , 1997. 264 с.
21. Рахманов В. А., Довжик В. Г. Свойства и расчетные характеристики полистиролбетонного конструкционно-теплоизоляционного материала для наружных самонесущих стен. *2-й Международный симпозиум по конструкционным легким бетонам*. Норвегия, 2000. С. 680–689.
22. Некрасов К. Д., Тарасова А. П. Жаростойкий бетон на портландцементе. Москва : Стройиздат, 1969. 192 с.
23. Некрасов К. Д. Жароупорный бетон. Промстройиздат, 1957. 283 с.
24. Мельников Ф. И. Физико-химические процессы, протекающие в жароупорных растворах и бетонах на портландцементе. В сб. НИИЖБ «Технология и свойства жароупорных бетонов». Госстройиздат. 1962. С. 23–27.
25. Ефремов А. Н., Лищенко А. Н. Влияние добавок шлака и золы-уноса ТЭС на жаростойкие свойства портландцементного камня. *Вісник ДНАБА. Сучасні будівельні матеріали*. Вип. 2010-1(81). 2010. С. 221–225.
26. Ефремов А. Н., Лищенко А. Н. Влияние добавок шлака и золы-уноса ТЭС на жаростойкие свойства портландцементных пенобетонов. *Вісник ДНАБА. Сучасні будівельні матеріали*. Вип. 2011. 1(87). 2011. С. 112–115.
27. Гузий С. Г., Кривенко П. В. Выбор критериев оценки и основных показателей качества антикоррозионных

- покрытий с целью повышения коррозионной стойкости строительных металлических конструкций в агрессивных средах. *Будівельні матеріали та вироби*. 2010. № 2. С. 17–19.
28. Будников П. П. Избранные труды Изд. АН УССР. 1960. С. 195–204.
  29. Журавлев В. Ф. и др. О механизме действия минерализаторов при образовании силикатов кальция. *Цемент*. 1950. № 3. С. 16–22.
  30. Инструкция по технологии приготовления и применения жаростойких бетонов, СН. М. : Стройиздат, 1979. С. 39.
  31. ГОСТ 20910-90. Бетоны жаростойкие. Технические условия. [Действителен от 1991-01-07.]. М. : 1991. 18 с.
  32. Некрасов Л. Д., Жуков В. В., Гуляева В. Ф. Рекомендации по защите бетонных и железобетонных конструкций от хрупкого разрушения при пожаре. Стройиздат. 1979. С. 20
  33. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций, предназначенных для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур. НИИЖБ. М. : 1989. С. 184.
  34. Салманов Г. Д. Жароупорный бетон на портландцементе для несущих строительных конструкций ЦНИИПС. Стройиздат, 1952. Вып. 6. С. 16–25.
  35. Мельников Ф. И. Подбор состава жаростойких бетона Жароупорные бетон и железобетон в строительстве. Стройиздат, 1962. С. 33–39.
  36. Федоров А. Е., Михальчук П. А. Разработка режимов электропрогрева жаростойких бетонов. В сб. НИИЖБ: «Жаростойкие бетоны». Стройиздат, 1964. С. 64–72.
  37. Жуков В. В., Панюков Э. Ф. Термостойкость железобетонных конструкций. К. : Будівельник, 1991. 224 с.
  38. Жуков В. В. Основы стойкости бетона при действии повышенных и высоких температур : дис. ... д-ра. техн. наук. Москва, 1981. 437 с.
  39. Жуков В. В. Основные вопросы сушки жаростойких бетонов. *Жаростойкий бетон и железобетон и области их*

- эффективного применения в строительстве* : материалы совещания. М. : Стройиздат, 1969. Вып. 4. С. 51–65.
40. Жуков В. В., Перегудов В. В. Технология первого разогрева тепловых агрегатов из жаростойкого бетона до рабочей температуры при одностороннем нагреве. *Жаростойкий бетон и железобетон и области их эффективного применения в строительстве*. 1966. № 1. С. 18–23.
  41. В. Г. Петров-Денисов В. Г., Л. А. Масленников Л. А., А. М. Пичков А. М. Исследование процесса сушки жаростойкого бетона. *Жаростойкий бетон и железобетон и области их эффективного применения в строительстве*. 1966. № 2. С. 41–55.
  42. Рекомендации по сушке и первому разогреву тепловых агрегатов, выполненных из жаростойкого бетона. М. : НИИЖБ, 1978. 32 с.
  43. Мириев И. М., Гусейнова Л. Б., Дубашинский Л. Б., Алиханов К. Н. Свойства легких жароупорных бетонов на заполнителях из отходов промышленности и местного сырья. *Жаростойкие бетон и железобетон и области их эффективного применения в строительстве*. 1969. С. 32–41.
  44. Шейкин А. Е., Чеховский Ю. В., Бруссер М. И. Структура и свойства цементных бетонов. Москва: Стройиздат, 1979. 344 с.
  45. Огнеупорные бетоны : справочник / под. ред.: С. Р. Замятин, А. К. Пургин, Л. Б. Хорошавин, И. П. Цибин, В. Д. Кокшаров. М. : Металлургия, 1982. 190 с.
  46. Берг О. В., Щербakov Е. Н., Писанко Г. Н. Высокопрочный бетон. Москва : Стройиздат, 1971. 208 с.
  47. Вознесенский В. А., Ляшенко Т. В., Огарков Б. Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. К. : Вища школа, 1989. 328 с.
  48. Стольников В. В., Литвинова Р. Е. Трещиностойкость бетона. Москва : Энергия, 1972. 113 с.
  49. Хигерович М. И., Байер В. Е. Гидрофобно-пластифицирующие добавки для цементов, растворов и бетонов. М. : Стройиздат, 1979. 125 с.

50. Горчаков В. И., Капкин М. М., Скрамтаев Б. Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. М. : Стройиздат, 1965. 195 с.
51. Добролюбов Г., Ратинов В. Б., Розенберг Т. И. Прогнозирование долговечности бетона с добавками. М. : Стройиздат, 1983. 212 с.



Наукове видання

*Дворкін Леонід Йосипович  
Бордюженко Олег Михайлович  
Житковський Вадим Володимирович  
Кочкарьов Дмитро Вікторович  
Марчук Віталій Вікторович*

## **РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВІ БЕТОНИ І МАТЕРІАЛИ НА ЇХ ОСНОВІ**

Монографія

*Технічний редактор*

*Г.Ф. Сімчук*

Підписано до друку 25.09.2020 р. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Ум.-друк. арк. 17,7. Обл.-вид. арк. 18,6.  
Тираж 100 прим. Зам. № 5501.

*Видавець і виготовлювач  
Національний університет  
водного господарства та природокористування,  
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028.*

*Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до  
державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів  
видавничої продукції РВ № 31 від 26.04.2005 р.*